

VAASAN YLIOPISTO

TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ

SÄHKÖTEKNIikka

Jaakko Kropsu

Kaksikääinen oikosulkumoottori redundanttisessa taajuusmuuttajaohjauksessa

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Vaasassa

25.2.2019

Työn valvoja

Työn ohjaaja

Työn tarkastaja

Timo Vekara

Jouni Ikäheimo

Jere Kolehmainen

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Vaasan ABB Oy moottorit ja generaattorit -yksikön tuotekehitysosastolle ja työn ohjaajana toimi tekniikan tohtori Jouni Ikäheimo. Haluan suuresti kiittää Jounia haastavasta ja erittäin mielenkiintoisesta aiheesta sekä työn ohjaamisesta. Lisäksi haluan kiittää DI Alpo Haurua ja DI Matti Fyhriä sekä ABB Drivesin henkilökuntaa kaikesta avusta diplomityöhöni liittyen. Kiitokset myös Timo Vekaralle opintojen aikaisesta ohjauksesta ja diplomityön kommentoinnista ja Jere Kolehmaiselle kiitokset diplomityön tarkastamisesta.

Lämpimät kiitokset myös perheelleni ja ystäväilleni kaikesta tuesta ja kannustamisesta opintojeni aikana.

Vaasassa 25.2.2019

Jaakko Kropsu

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	1
SISÄLLYSLUETTELO	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	8
JOHDANTO	9
1 KAKSIKÄÄMINEN OIKOSULKUMOOTTORI	10
1.1 Oikosulkumoottori	10
1.1.1 Rakenne	10
1.1.2 Toimintaperiaate	10
1.1.3 Kaksikäämikoneen määritelmä ja ominaisuudet	11
1.2 Moottorivirran kokonaissärö	12
1.2.1 Rakenteesta johtuvat yliaallot	13
1.2.2 Yliaaltojen vähentäminen	15
1.3 Oikosulkumoottorin induktanssit	16
1.3.1 Magnetoimisinduktanssi	16
1.3.2 Hajainduktanssi	16
1.3.3 Keskinäisinduktanssi	19
2 REDUNDANTTINEN KÄYTTÖ SÄHKÖISESSÄ PROPULSIOSSA	24
2.1 Redundanttinen propulsiojärjestelmä	24

2.2	Taajuusmuuttaja	27
2.2.1	Redundanttisen syötön vaikutukset matalataajuisiin yliaaltoihin	28
2.2.2	Redundanttisen syötön vaikutukset korkeataajuisiin yliaaltoihin	28
2.2.3	Erillissäätö ja virtaestimaatti	29
3	STAATTORIKÄÄMITYKSEN SUUNNITTELU JA SIMULOINTI	32
3.1	Staattorikäämityksen suunnittelu	32
3.2	Simulointitulokset	34
3.2.1	Käämien asettelutapojen vertailu	34
3.2.2	Johtopäätökset käämien asettelutavoista	40
3.2.3	Kuusi- ja kolmivaiheisen moottorin laskentatulosten vertailu	41
3.2.4	Virtatasapaino kaksikäämimoottorissa	43
4	KAKSIKÄÄMISEN OIKOSULKUMOOTTORIN MITTAUKSET	46
4.1	Käämien välinen syöttövirtojen kulma	48
4.2	Virtatasapaino	49
4.3	Käämivirran yliaallot	50
4.4	Kaksikäämisen oikosulkumoottorin lämpenemäko	52
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	57
	LÄHTEET	59
	LIITTEET	63

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Käytetyt symbolit ja suureet

α_i	yhden navan vuontiheyden artimeettisen keskiarvon suhde sen huippuarvoon	eng. ratio of arithmetical average of the flux density to its peak value
θ_a	jäähdyskkeen lämpötila	eng. temperature of the coolant
θ_{Cu}	käämin lämpenemä	eng. temperature rise of the coil
θ_1	kylmän käämin resistanssi	eng. temperature of the cold winding
θ_2	käämin loppulämpötila lämpenemäko- keen jälkeen	eng. temperature of the winding at the end of thermal test
λ_b	käämin permeanssi urapohjalla	eng. winding permeance at the bot- tom of the slot
λ_t	käämin permeanssi urasuulla	eng. winding permeance on the sur- face of the slot
λ_{tb}	saman uran jakavien käämien välinen per- meanssi	eng. permeance between windings in the same slot
μ	permeabiliteetti	eng. permeability
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti	eng. permeability of vacuum
σ_δ	hajakerroin	eng. leakage factor
ν	harmonisen yliaallon järjestysluku	eng. ordinal number of harmonic
τ_p	jänteistyskerroin	eng. pole pitch
Φ	magneettivuo	eng. magnetic flux
ϕ_s	vaiheiden välinen vaihesiirtokulma yhteis- sessä urassa	eng. angle between phases in the common slot
ω	kulmanopeus	eng. angular frequency
a	rinnakkaisten haarojen lukumäärä käämi- tyksessä	eng. number of parallel paths in windings

B	magneettivuon tiheys	eng. magnetic flux density
E	sähkömotorinen voima	eng. electromotive force
F_1	perusaallon amplitudi	eng. amplitude of fundamental component
F_v	käämitysharmonisen komponentin magnetomotorisen voiman suuruus	eng. electromotive force of winding harmonic
I	sähkövirran voimakkuus	eng. electric current
i_{est}	virtaestimaatti	eng. estimation of current
$i_{2\text{est}}$	kuormavirran estimaatti	eng. estimation of load current
I_N	virran perusaallon amplitudi	eng. fundamental component of current
I_h	virtayliaallon amplitudi	eng. amplitude of current harmonic
k	yliaallon kertaluku	eng. ordinal of harmonic
k_{dv}	ryhmäkerroin	eng. distribution factor
k_k	korjauskerroin	eng. correction factor
k_{pv}	vyyhtikerroin	eng. pitch factor of the coil side shift in a slot
k_{wv}	käämityskerroin	eng. winding factor
L_{sq}	vinoinduktanssi	eng. skew leakage inductance
L_u	urainduktanssi	eng. slot inductance
L_w	vyyhdenpään hajainduktanssi	eng. end winding leakage inductance
L_δ	ilmavälin hajainduktanssi	eng. leakage inductance of air-gap
L_σ	kokonaishajainduktanssi	eng. total leakage inductance
$L_{\sigma 12}$	staattorikäämien välinen keskinäishajainduktanssi	eng. leakage inductance between windings
l'	staattoripakan pituus	eng. effective core length
M_s	keskinäisinduktanssi	eng. mutual inductance

m	vaihemäärä	eng. number of phases
N	käämin kierrosluku	eng. number of turns in a winding
Q	uraluku	eng. number of slots
q	vakoluku	eng. number of slots per pole and phase
R	resistanssi	eng. resistance
s	roottorisauvan vinous	eng. skewing measured as an arc length
U	jännite	eng. voltage
V	tilavuus	eng. volume
W	vyyhdenleveys	eng. coil span
X_m	magnetointireaktanssi	eng. magnetizing reactance
X_δ	yliaaltoreaktanssi	eng. harmonic reactance
z_Q	uran johdinmäärä	eng. number of conductors in a slot

Käytetyt lyhenteet

DOL	suora verkkokytkentä	eng. direct online
DTC	suora momenttisäätö	eng. direct torque control
DTP	kaksikäämimoottori	eng. dual three phase machine
IGBT	eristehila-bipolaaritransistori	eng. insulated gate bipolar transistor
PWM	pulssinleveysmodulaatio	eng. pulse width modulation
mmv	magnetomotorinen voima	eng. electromotive force
THD	kokonaissärö	eng. total harmonic distortion

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö

Tekijä:	Jaakko Kropsu
Diplomityön nimi:	Kaksikäminen oikosulkumoottori redundanttisessa taajuusmuuttajaohjauksessa
Työn valvoja:	Timo Vekara
Työn ohjaaja:	Jouni Ikäheimo
Työn tarkastaja:	Jere Kolehmainen
Tutkinto:	Diplomi-insinööri
Oppiaine:	Sähkötekniikka
Yksikkö:	Sähkö- ja energiatekniikan yksikkö
Koulutusohjelma:	Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma
Suunta:	Sähkötekniikka
Opintojen aloitusvuosi:	2011
Tutkielman valmistumisvuosi:	2019

Sivumäärä: 72

TIIVISTELMÄ

ABB oy:n Moottorit ja Generaattorit -yksikkö halusi tutkia kaksikäamisen oikosulkumoottorin suorituskykyä redundanttisessa eli rinnakkaisessa taajuusmuuttajakäytössä. Redundantti moottori ja taajuusmuuttajasyöttö ovat kiinnostavia erityisesti sähköisen propulSION eli työntövoiman näkökulmasta. Oikosulkumoottori sisältää kaksi kolmivaiheista staattorikäymistä, joita syötetään redundanttisesti kahdella taajuusmuuttajalla. Redundanttisen syötön on tutkittu aiheuttavan kuitenkin ongelmia moottorin ohjaukseen ja suorituskykyyn. Kahden käämin ohjauksessa taajuusmuuttajien välillä voi esiintyä häiriöitä, jotka kasvattavat moottorin häviöitä ja heikentävät säädön stabiilisuutta. Erillissäätö on kiinnostava säätötapa sen yksinkertaisuuden vuoksi, mutta tutkimustietoa sen toimivuudesta ei ole vielä paljoa saatavilla.

Työn teoriaosuudessa käsitellään kaksikäamisen oikosulkumoottorin induktanssit ja yliaaltojen syntymekanismit, sekä tutkitut kaksikäämisten staattorien asettelut. Fcsmek-ohjelmaa hyödyntäen suunniteltiin kaksikäminen staattori, ja moottorin toimintaa mallinnettiin kahdella taajuusmuuttajalla syötettynä erilaisilla käämien asetteluilla. Laskelmien perusteella valittiin paras käämien asettelu ja Fcsmek-laskelmaan perustuen valmistettiin kaksikäämisen moottorin prototyyppi, jonka suorituskyky selvitettiin mittauksilla.

Työssä vahvistettiin aikaisemmissa tutkimuksissa tehty havainto, että mallinnetuista kytkennöistä YY30-kytkentä sopii parhaiten kaksikäämisen staattorin asetteluksi. Prototyyppimoottorin mittauksissa selvisi, että matalan taajuuden 5. ja 7. yliaalto ovat hieman korkeammat kaksikäämimoottorissa verrattuna kolmivaiheiseen moottoriin, mutta suhteessa virran perusaaltoon yliaaltojen amplitudit ovat pieniä. Kaksikäämisessä oikosulkumoottorissa erillissäädöstä ja moottorin rakenteesta aiheutui muutaman asteen suuruista ylimääräistä lämpenemistä johtuen staattorikäämeissä kiertävistä kytkentätaajuisista yliaalloista ja virtojen epäsymmetriasta toisessa käämissä.

AVAINSANAT: Kaksikäämimoottori, oikosulkumoottori, yliaallot, redundanttisuus, taajuusmuuttaja

UNIVERSITY OF VAASA
School of technology and innovations

Author:	Jaakko Kropsu
Topic of the thesis:	A dual winding squirrel cage induction motor supplied by redundant frequency converters
Supervisor:	Timo Vekara
Instructor:	Jouni Ikäheimo
Evaluator:	Jere Kolehmainen
Degree:	Master of Science in Technology
Department:	Department of Electrical Engineering and Energy Technology
Degree Programme:	Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
Major of Subject:	Electrical Engineering
Year of Entering the University:	2011
Year of Completing the Thesis:	2019

Pages: 72

ABSTRACT

ABB oy, Motors and Generators is interested in the possibility to supply a dual winding squirrel cage motor with two independent frequency converters. This setup is mostly used in ships where redundancy of an electric propulsion system is considered very important. Dual stator motor has two galvanically isolated winding sets in a mutual stator core. It has been found that two independent frequency converters disturb each other and decrease the motor performance. The disturbance between frequency converters can also cause problems in control system. This independent control method is attractive due to its simplicity, but there is not much research data available of it yet.

The theory part of this work consists of inductances of the dual winding induction motor and current harmonics caused by the frequency converter supply and by the structure of the motor. Also, previously studied ways to set windings in the stator core are reviewed. Different winding arrangements supplied by frequency converters are modeled and simulated with Fcsmek program. The best winding arrangement was chosen considering harmonic content in current and airgap flux. Based on Fcsmek calculation, a dual winding motor prototype was built and its performance was examined by measurements.

In this thesis it was found out that the best winding arrangement for dual winding motor is YY30 as previous studies suggest. Measurements of the prototype motor show that amplitude of fifth and seventh harmonic are slightly higher compared to a three-phase machine supplied by one frequency converter. However, low frequency harmonics are small compared to fundamental component of the current and they are not considered as a major problem. Two independent frequency converters cause a little more high frequency harmonics compared to single frequency converter. Because of this, couple of extra degrees in temperature rise for dual winding motor was found.

AVAINSANAT: Dual three phase, squirrel cage motor, harmonics, redundancy, frequency converter

JOHDANTO

Meriteollisuudessa sähköinen propulsiojärjestelmä on yleistynyt säätötekniikan kehittymisen myötä. Sähköisessä propulsiojärjestelmässä laivan potkuria pyörittää dieselmootorin sijasta sähkömoottori. Laivan propulsiotehon katkeaminen voi aiheuttaa suuria ympäristö-, materiaali- tai henkilövahinkoja. Tämän vuoksi meriteollisuudessa suositaan propulsiojärjestelmän redundanttisuutta, joka tarkoittaa, että yksi vikaantunut komponentti ei pysäytä kokonaan sähköisen propulsiojärjestelmän toimintaa. Tämä tarkoittaa rinnakkaisia komponentteja, jotka eivät ole riippuvaisia toistensa toiminnasta. Yksittäisen moottorin tapauksessa redundanttisuutta tavoitellaan luomalla staattoriin useampi käämitys, joita syötetään itsenäisillä toisistaan riippumattomilla taajuusmuuttajilla.

Moottorin ohjaaminen taajuusmuuttajalla tuottaa kuitenkin aina yliaaltoja ja on tutkittu, että kaksikämmimoottorissa ongelmana ovat staattorikäämeissä kiertävät korkeataajuiset yliaaltovirrat, kun sitä ohjataan kahdella taajuusmuuttajalla. Ylimääräisiä kytkeäntaajuisia yliaaltoja syntyy, kun taajuusmuuttajat havaitsevat toisesta käämityksestä indusoituneen jännitteen aiheuttaman virran, jolloin tapahtuu taajuusmuuttajien ristiin kytkeytymistä. Tässä työssä taajuusmuuttajien erillissäädössä hyödynnetään virtaestimaattia eli laskettua virtaa, jolloin taajuusmuuttajat eivät havaitse käämien välillä indusoituneiden jännitteiden aiheuttamia virtoja.

Suurien laivojen liikuttamiseen tarvitaan suuria moottoritehoja ja siten myös virrat ovat suuria. Tällöin myös taajuusmuuttajissa on käytettävä virtakestoisuudeltaan suurempia ja kalliimpia puolijohdekomponentteja. Jakamalla käämitys useammalle vaiheelle, voidaan vaihevirtoja pienentää kasvattamatta jännitettä. Redundanttisuus ja mahdollisuus käyttää pienemmän virrankestoisuuden omaavia komponentteja ovat pääasialliset syyt monivaihekoneiden kiinnostavuudelle. Tässä työssä tutkitaan, ovatko kahden taajuusmuuttajan syötöstä aiheutuneet ongelmat riittävän pieniä, jotta ne eivät peittoa kaksikämmisellä staattorilla tavoiteltavia etuja. Lisäksi tarkastellaan erilaisia käämien asetteluja yliaaltojen ja redundanttisuuden näkökulmasta.

1 KAKSIKÄÄMINEN OIKOSULKUMOOTTORI

1.1 Oikosulkumoottori

Sähkömoottoreissa kulutetaan lähes kolmasosa kaikesta maailmassa tuotetusta sähköenergiasta ja määrän uskotaan kasvavan vielä tulevaisuudessa, joten moottorien hyötysuhteen ja ohjausmenetelmien kehittäminen on suuresti kiinnostuksen kohteena. Oikosulkumoottori on kaikista eniten käytetty moottorityyppi ja sen suosiota selittää yksinkertainen rakenne, luotettavuus ja vähäinen huollontarve. (Karttunen 2017: 17; Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 342.)

1.1.1 Rakenne

Sähkömoottorit koostuvat aktiivi- ja passiiviosista. Aktiiviosiin luetaan staattori ja roottori. Muut osat kuuluvat passiiviosiin. Roottori pyörii staattorin sisällä laakereiden varassa ja niitä erottaa pieni ilmaväli. Aktiiviosat muodostavat ilmavälin välityksellä moottorin magneettipiirin. Passiiviosien tehtävänä on pitää aktiiviosat paikallaan ja kuljettaa sähköenergia koneeseen. Aktiiviosat muuttavat sähköenergian mekaaniseksi energiaksi, joka tuodaan moottorista akselin välityksellä.

Staattorin urituksiin sijoitetut yksittäiset vyyhdet muodostavat monivaiheisen urakäämityksen. Oikosulkumoottorin roottorissa on usein alumiinista valettu häkkikäämitys, mutta myös muita metalleja voidaan käyttää haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi.

1.1.2 Toimintaperiaate

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu staattorin luomaan pyörivään magneettikenttään, joka indusoi jännitteen roottorin häkkikäämitykseen. Oikosulkumoottori on epätahtikone, joten sen roottori pyörii magneettikenttään nähden eri nopeudella. Nopeammin pyörivä magneettikenttä leikkaa roottorin häkkikäämityksen sauvoja ja niihin indusoituu jännite.

Indusoitunut jännite aiheuttaa virran, joka synnyttää sähköisen vääntömomentin. Roottorin ja magneettikentän nopeuseroa kutsutaan jättämäksi. Jättämän kasvaessa roottorin häkkikäämitys kokee nopeammin vaihtelevan magneettivuon ja vääntömomentti kasvaa. (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 342.)

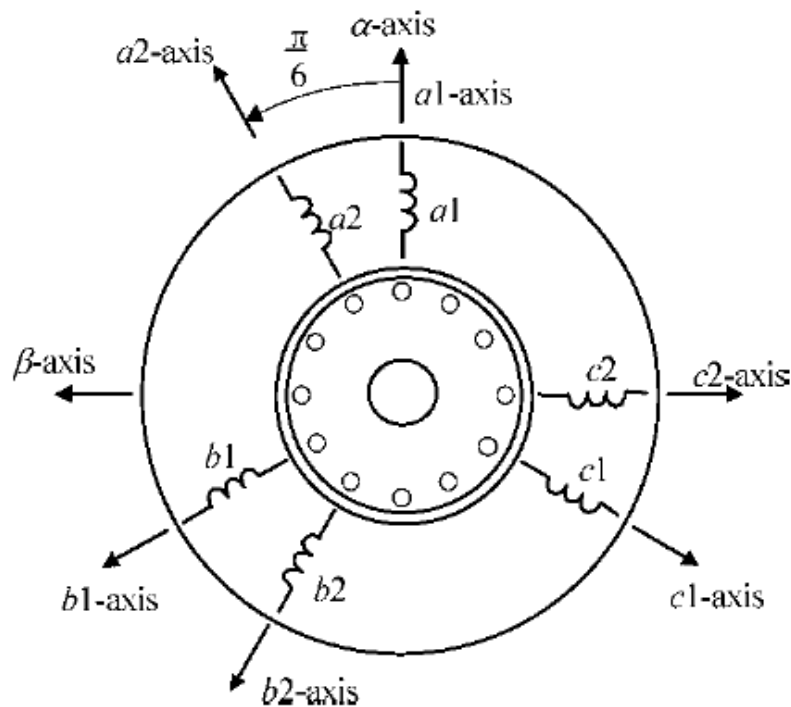
1.1.3 Kaksikäänikoneen määritelmä ja ominaisuudet

Tyypillisesti monivaihekoneet on toteutettu 5- 7- tai 9- vaiheisina, mutta kolmivaihekäämityksen monikertoja käytetään yleensä, kun moottorilta vaaditaan suuria tehoja esimerkiksi laivan propulsiossa. Käämiryhvät asetetaan kuusivaiheisessa käämityksessä tavallisesti 0, 30, tai 60 asteen kulmaan toisiinsa nähden. Jos käämit asetetaan urituksiin 0 tai 60 asteen vaihe-erolla, on kyse symmetrisestä kaksikäänimoottorista. Epäsymmetrinen asettelu 30 asteen vaihesiirrossa on kuitenkin suosituin, jolloin puhutaan epäsymmetrisestä kaksikäänimoottorista (eng. dual three phase machine, DTP) Kirjallisuudessa käytetään samaisesta konetyypistä myös muita englanninkielisiä termejä: double star ja dual stator. (Levi, Bojoi, Toliyat & Williamson 2007.) Tässä työssä termillä kaksikäänimoottori viitataan kaksikäänimiseen oikosulkumoottoriin.

Kaksikäänimoottorin ohjaaminen kahdella taajuusmuuttajalla tuo joitakin etuja verrattaessa sitä saman tehoisen kolmivaihemoottorin ohjaukseen yhdellä taajuusmuuttajalla. Tärkeimpiä niistä ovat:

- Vaihevirrat pienenevät, kun virta jaetaan kuudelle vaiheelle ja voidaan käyttää pienemmän virrankestoisuuden omaavia komponentteja.
- Moottori voi jatkaa pyörimistä osateholla yhden tai useamman saman käämiryhmän vaiheen vikaantuessa.
- Korkeataajuisempi vääntömomentinvärähtely. (Levi, Bojoi, Toliyat & Williamson 2007.)

Vaihemäärän lisäämisen kolmesta kuuteen on havaittu vähentävän staattorissa syntyviä kuparihäviöitä noin 7 prosenttiyksikköä, mutta kaksikämmimoottorien tunnettuna ongelmana ovat moottorin suorituskykyä alentavat koneen rakenteesta ja syötöstä johtuvat matala- ja korkeataajuiset yliaallot. Yliaallot lisäävät roottorin kuparihäviöitä ja staattorin rautahäviöitä (Levi, Bojoi, Toliyat & Williamson 2007). Kuvassa 1 on esitetty epäsymmetrisen kaksikämmimoottorin käämit 30 asteen vaihesiirrossa.



Kuva 1. Epäsymmetrisen kaksikämmisen oikosulkumoottorin käämien asettelu 30 asteen vaihesiirrossa (Levi, Bojoi, Toliyat & Williamson 2007).

1.2 Moottorivirran kokonaissärö

Moottorivirta ei ole koskaan täysin sinimuotoista vaan yliaallot aiheuttavat siihen säröä. Yliaallot pyritään eliminoimaan, koska ne aiheuttavat moottorissa ylimääräistä lämpenemää ja alentavat kuormitettavuutta. Tässä kappaleessa käsitellään yliaaltoja, jotka syntyvät sinimuotoisella syötöllä eri vaiheisten käämitysten vuorovaikutuksesta, ja joihin voi-

daan vaikuttaa moottorin huolellisella suunnittelulla. Virran yliaaltojen amplitudeja verrataan perusaallon amplitudiin, josta saadaan laskettua virran kokonaissärö (eng, total harmonic distortion, THD) yhtälöllä

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_N} \cdot 100\%, \quad (1)$$

missä I_h on järjestyslukua h vastaavan yliaallon amplitudi ja n tarkoittaa Nyquistin taajuutta vastaavaa yliaallon järjestyslukua ja I_N on virran perusaallon amplitudi.

1.2.1 Rakenteesta johtuvat yliaallot

Yliaaltojen syntyyn vaikuttaa merkittävästi staattorin rakenne ja käämitysten asettelu. Puoliavoimissa tai avoimissa urituksissa ilmaväli on lyhempi staattorihampaiden kohdalla kuin urien kohdalla. Tämän vuoksi magnetomotorisen voiman (mmv) kohtaama reluktanssi r_m vaihtelee roottorin pyöriessä. Reluktanssin muuttuminen aiheuttaa magneettisen johtavuuden eli permeanssin vaihtelun staattorin kehällä. Permeanssin vaihtelun myötä syntyy moottorin ilmaväliuohon permeanssiyliaaltoja. (Pyrhönen 1991: 56–65.)

Toinen moottorin rakenteessa yliaaltoja aiheuttava merkittävä tekijä on käämitysten asettelu staattorin urituksiin. Ideaalitilanteessa ilmaväliuho on sinimuotoinen, mutta todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole. Ilmaväliuohon muutoksia aiheuttavat jäniteistys ja staattorikäämien epätasainen jakautuminen staattorin kehälle, mistä syntyy askelmainen mmv (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 56–81). Kun staattorikäämitys jaetaan useaan uraan, niin niiden tuottama mmv on pienempi kuin tilanteessa, jossa käämitys sijaitsee samassa urassa, koska vaiheen käämien välille syntyy paikallista vaihesiirtoa. Ryhmäkerroin k_{dv} kertoo kuinka paljon mmv alenee, kun käämitys jaetaan urituksiin. Käämituksen jakaminen urituksiin otetaan huomioon yhtälöllä

$$k_{dv} = \frac{\sin(v \frac{\pi}{2m})}{q \sin(v \frac{\pi}{2mq})}, \quad (2)$$

missä q on vakoluku, v on harmonisen yliaallon järjestysluku ja m on vaihemäärä. Hal-
kaisijakäämityksen lisäksi käytetään myös tarvittaessa jänteistystä, jossa käämin vyyh-
denleveys on eri suuri napajakoon nähden. Jänteistys pienentää käämityksen luomaa
magneettivuota ja magnetomotorista voimaa, mikä huomioidaan vyyhtikertoimella

$$k_{pv} = \sin\left(v \frac{W}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

missä W tarkoittaa vyyhden leveyttä τ_p jänteistyskerrointa. Myös roottorin uravinauden
vaikutus yliaaltoihin voidaan tarvittaessa ottaa käämikertoimessa huomioon vinokerto-
mella

$$k_{sqv} = \frac{\sin\left(v \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right)}{v \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2}}, \quad (4)$$

missä s on roottorisauvan vinous. Ryhmä-, vyyhti- ja vinokertoimen tulosta saadaan las-
kettua käämityskerroin

$$k_{wv} = \frac{\sin\left(q \frac{\pi}{2m}\right)}{q \sin\left(v \frac{\pi}{2mq}\right)} \sin\left(v \frac{W}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right) \left[\frac{\sin\left(v \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right)}{v \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2}} \right]. \quad (5)$$

Jänteistys ja käämitysten jakaminen urituksiin aiheuttavat käämitysharmonisia yliaaltoja,
joiden mmv:n suuruudet voidaan ratkaista yhtälöstä

$$F_v = F_1 \left(\frac{k_{wv}}{k_{1wv}} \right), \quad (6)$$

missä F_1 on perusaallon amplitudi, perusaallon käämityskerroin on k_{1wv} ja k_{wv} on järje-
tysluvun v käämityskerroin. (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 78–79.) Permeans-
siharmoniset yliaallot summautuvat käämitysharmonisten yliaaltojen kanssa, kun ne sat-
tavat samalle järjestysluvulle. Summautuneita yliaaltoja kutsutaan uraharmonisiksi yli-
aalloiksi, jotka muodostavat suurimman osan yliaaltojen aiheuttamista häviöistä. (Vesala
2010: 32–38.)

1.2.2 Yliaaltojen vähentäminen

Moottorin rakenteesta johtuviin yliaaltoihin voidaan vaikuttaa tietyillä yksityiskohdilla staattorin ja roottorin rakenteessa. Permeanssiharmonisten yliaaltojen määrään voidaan vaikuttaa staattoriurien kavennuksella ja muotoilulla sekä käyttämällä puolimagneettisia urakiiloja. Nämä menetelmät perustuvat magneettivuon tiheyden tasaamiseen urien kohdalla, jolloin ilmapälin magneettivuon on kohtisuorassa roottoripintaa vasten ja ilmapälin permeanssin vaihtelu pienenee. (Vesala 2010: 39.)

Vakoluku vaikuttaa moottorin mmv:n sinimuotoisuuteen ja siten myös moottorissa syntyviin yliaaltoihin. Käyttämällä suurempaa vakolukua, saadaan aikaiseksi sinimuotoisempi ilmapälin mmv (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 56–59). Vaikka jänteistys voi itsessään aiheuttaa yliaaltoja, voidaan 5/6-jänteistyksellä pienentää erityisesti pienen järjestysluvun 5. ja 7. yliaaltoja. Kun hajakerroin kerrotaan magnetointireaktanssilla X_m , saadaan yliaaltoreaktanssi X_δ , jonka avulla mallinnetaan yliaaltojen syntyä. Hajakerroin saadaan yhtälöstä

$$\sigma_\delta = \sum_{v \neq 1} \left(\frac{k_{wv}}{vk_{1wv}} \right)^2. \quad (7)$$

Suuri hajakerroin pienentää magnetointireaktanssin aiheuttamaa mmv:n perusaaltoa ja kasvattaa ilmapälinissä esiintyviä yliaaltoja. 5/6-jänteistyksellä hajakerroin on pienimmillään. (Vesala 2010: 35–45.)

Permeanssiharmonisten vaikutusta voidaan myös vähentää oikosulkumoottoreissa asettamalla roottorin urat vinoon asentoon roottorin akseliin nähden. Uravinoudella heikennetään staattori- ja roottorikäänityksen välistä magneettista kytkeytymistä. Tämä heikentää myös ilmapälinvuon yliaaltojen mahdollisuuksia indusoitua roottorin sauvoihin. (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 239–240.)

1.3 Oikosulkumoottorin induktanssit

Moottorin induktanssit ja harmoniset yliaallot ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa ja siksi niiden tunteminen on tärkeää moottorin suunnittelun kannalta (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 230–263). Sähkömoottoreissa kokonaisvuo ei osallistu kokonaan sähkö-energian muuttamiseen mekaaniseksi energiaksi. Energian muuntoon osallistuvaa vuota kutsutaan päävuoksi ja siihen osallistumatonta hajavuoksi. (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 233.)

1.3.1 Magnetoimisinduktanssi

Magnetoimisinduktanssin luo vuo, joka yhdistää staattorin ja roottorin ilmvälän välityksellä sähkömagneettisesti toisiinsa ja se on siten moottorin tärkein induktanssi. Magnetoimisinduktanssi ei todellisuudessa ole vakio, vaan vaihtelee jännitteen ja momentin funktiona (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 232). Magneettipiirin johtavuus on riippuvainen vuon arvosta. Vuon arvon ollessa pieni induktanssi on lähes vakio, mutta vuon arvon kasvaessa rautaosat alkavat kyllästyä ja induktanssi laskee magneettipiirin kyllästymisen seurauksena. (Ranta 2013: 21–22.)

1.3.2 Hajainduktanssi

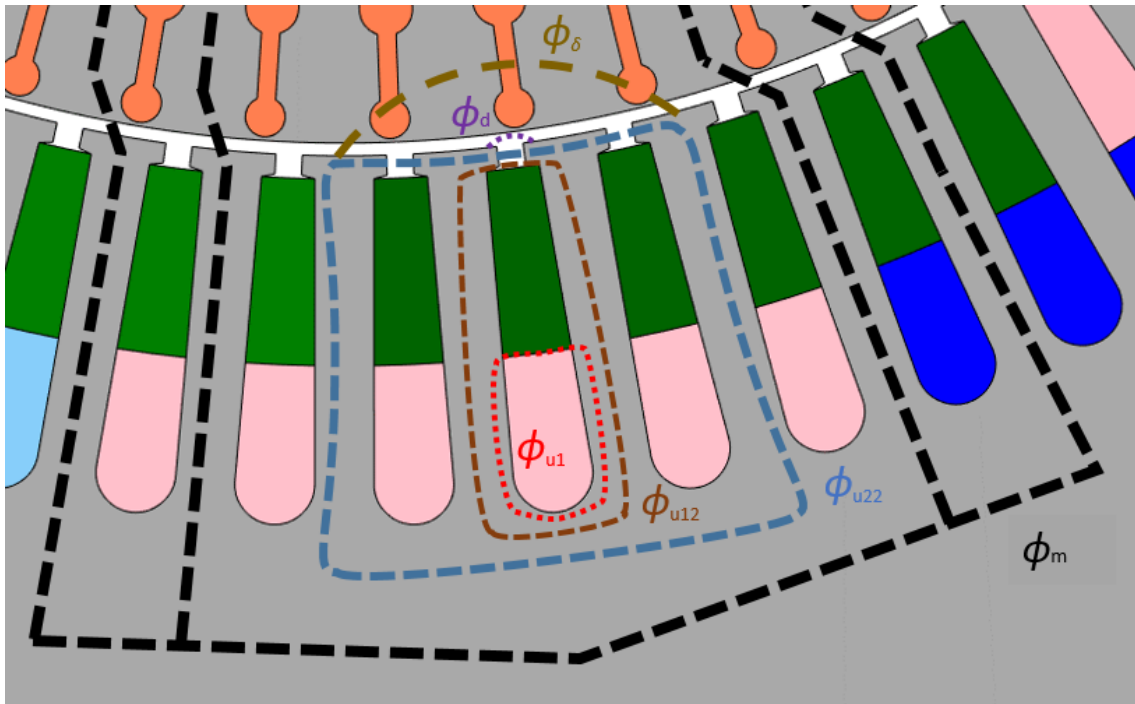
Hajavuoksi lasketaan vuokomponentit, jotka eivät ylitä ilmväliä ja komponentit, jotka ylittävät ilmvälän, mutta eivät osallistu energian muuntoon. Hajavuolla ajatellaan usein olevan vain negatiivisia vaikutuksia, esimerkiksi häviöitä lisäävänä ominaisuutena. Hajavuon luomat induktanssit kuitenkin suodattavat virran yliaaltoja taajuusmuuttajakäytössä ja niiden suuruutta voidaan haluttaessa kasvattaa käyttötarkoituksen mukaan. (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 233–235.)

Hajavuo jaetaan ilmväliä ylittämättömiin ja ylittäviin komponentteihin, joihin liittyvät induktanssit ovat:

– vinoinduktanssi L_{sq}

- uran hajainduktanssi L_u
- vyyhdenpään hajainduktanssi L_w
- hampaanpään hajainduktanssi L_d
- ilmavälin hajainduktanssi L_δ .

Moottorin kokonaishajainduktanssi on siten yllä esitettyjen induktanssien summa ja se muodostaa moottorin kokonaisinduktanssista noin 5–10 %. (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 234–239, Krause, Wasynczuk, Sudhoff, & Pekarek 2013). Hajainduktanssi rajoittaa kaksikämmimoottorissa syöttöjännitteen sisältämiä ja koneen rakenteesta johtuvia harmonisia virtayliaaltoja (Kanerva, Toivanen, Sario & Arshad (2008). Kuvassa 2 on esitetty moottorin magnetoimisvuo ja hajavuot. ϕ_{u1} tarkoittaa yhden uran luomaa hajavuota, ϕ_{u12} on samassa urassa olevien vyyhden sivujen keskinäinen hajavuo ja ϕ_{u22} tarkoittaa vierekkäisten urien välistä hajavuota.



Kuva 2. Kaksikerroskäämityksen magnetoimisvuo ja hajavuot.

Ilmavälin hajainduktanssin suuruus on merkittävä pienen ilmavälin omaavissa sähkömoottoreissa, kuten oikosulkumoottorissa. Toisaalta roottorin häkkikäänitys vaimentaa yliaaltoja, joten ilmavälin hajainduktanssin vaikutus virtayliaaltojen suodatuksessa on vähemmän merkittävä. Vyyhdenpää sijaitsevat suhteellisen kaukana koneen rautaosista, joten vyyhdenpään hajainduktanssin suuruus on pieni verrattuna muihin hajainduktanssiin. (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 247–260.) Ellei koneen pituuden ja halkaisijan suhde ole kohtalaisen suuri, moottorissa ei ole pidennetty käämitysaskel tai sen muut induktanssit eivät ole merkittävän pieniä, ei vyyhdenpään hajainduktanssilla ole harmonisten virtojen suuruuteen isoakaan vaikutusta (Hsieh, Hsu, Dorrell & Hu 2007). Myös hampaanpään hajainduktanssi voidaan oikosulkumoottorissa jättää pois laskuista pienen ilmavälin vuoksi (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 260).

Oikosulkumoottorin merkittävimmät induktanssit harmonisten virtojen kannalta ovat uran hajainduktanssi ja roottorin vinoinduktanssi. Roottorin sauvojen vinous on osa käämikerrointa ja se vaikuttaa uraharmonisiin yliaaltoihin vaimentavasti (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 241). Jos muut hajainduktanssit oletetaan olemattomiksi, niin saadaan kokonaishajainduktanssiksi

$$L_{\sigma} = L_u + L_{sq}. \quad (8)$$

Uran hajainduktanssiin vaikuttaa suuresti kaksikerroskäämityksessä käytetty käämitysaskel, käämikierrosluku sekä käämien välinen vaihe-ero. Korjauskertoimella k_k huomioidaan jänteistykseen vaikutus kaksikerroskäämityksessä ja se lasketaan yhtälöstä

$$k_k = \frac{1}{2q} \sum_{s=1}^{2q} \cos \phi_s, \quad (9)$$

missä ϕ_s on yhteisessä urassa olevien vaiheiden välinen vaihesiirtokulma. Uran hajainduktanssi saadaan analyyttisesti yhtälöstä

$$L_u = \frac{4m}{Q} \mu_0 l' N^2 (\lambda_t + \lambda_b + 2k_k \lambda_{tb}), \quad (10)$$

missä μ_0 on ilman permeabiliteetti, Q on uraluku, l' on moottorin pakan pituus, N on käämin kierrosmäärä, λ_t on urasuulla olevan käämin permeanssi ja λ_{buran} pohjalla olevan käämin permeanssi, sekä λ_{tb} on yhteisessä urassa olevien käämien välinen permeanssi. (Liwschitz-Garik & Whipple 1950; Hsieh, Hsu, Dorrell & Hu 2007.)

1.3.3 Keskinäisinduktanssi

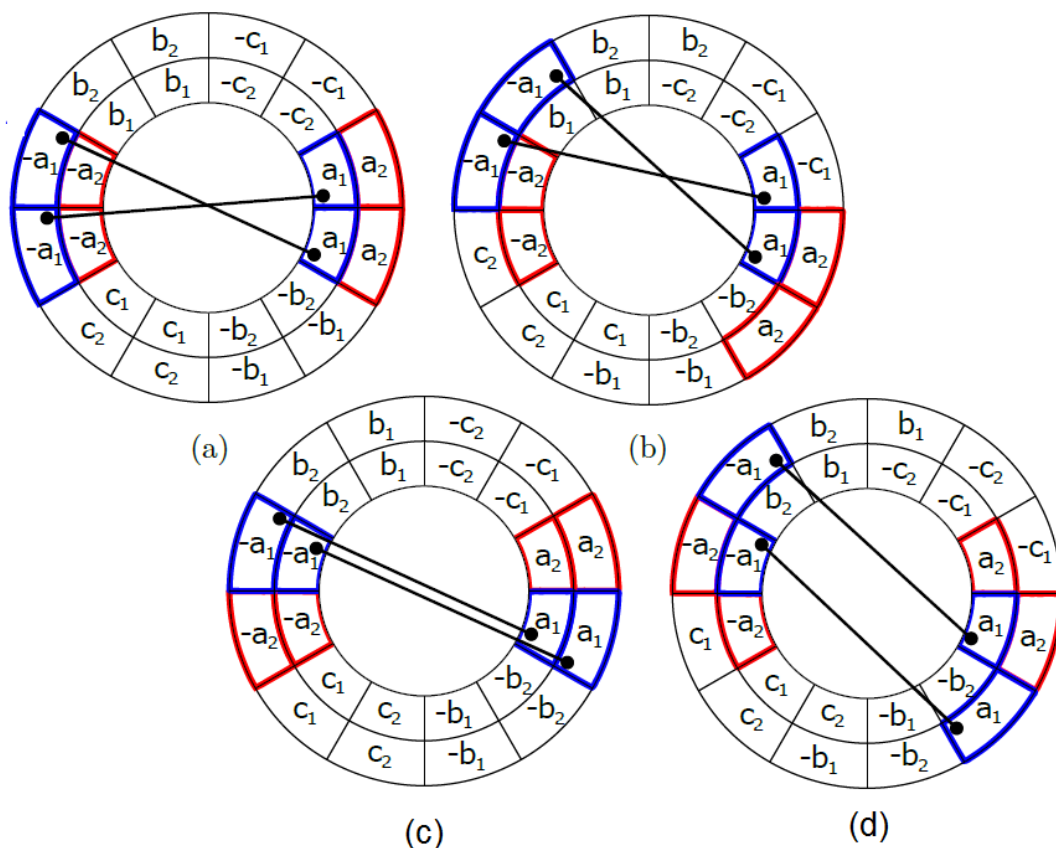
Kaksikämmimoottorissa käämien välillä on myös keskinäisinduktanssia. Mikäli käämien välillä on magneettista kytkeytymistä, niin toisen käämin jännitteen muutokset indusoivat jännitteitä toiseen käämiin. Käämien keskinäinen kytkeytyminen pyritään minimoimaan, koska indusoituneet virrat aiheuttavat ongelmia moottorin ohjauksessa. 90 asteen kulmassa olevien käämien välillä ei ideaalitulanteessa ole magneettista kytkeytymistä, mutta käämit kuitenkin linkittyvät keskinäishajavuon ja epätasaisen ilmavälivuon kautta toisiinsa (Kallio 2014). Keskinäishajainduktanssin suuruuteen vaikuttaa mm. käämien kierrosluku, muoto sekä etäisyys. Jänteistettynä kaksikerroskäämityksen vyyhtiryhmissä kulkee erisuuruiset virrat ja käämien välinen keskinäisinduktanssi pienenee jänteistämättömään käämitykseen verrattuna (Liwschitz-Garik & Whipple 1950). Käämien välinen keskinäisinduktanssi voidaan laskea yhtälöstä

$$M_s = \frac{2}{\mu l_1 l_2} \int_V B_1 B_2 dV, \quad (11)$$

missä B_1 ja B_2 ovat magneettivuon tiheyksiä, μ on permittiivisyys ja V on tilavuus. Mitä suurempi keskinäisinduktanssi on sitä enemmän muutokset ensimmäisen käämin jännitteessä vaikuttavat toisen käämin jännitteeseen. Indusoituvat jännitteet aiheuttavat virtoja joiden suuruutta rajoittaa käämin hajainduktanssi. Käämien keskinäisinduktanssin ja hajainduktanssin suhde saadaan yhtälöstä

$$\frac{M_s}{L_s} = \frac{L_{\sigma 12}}{L_{\sigma s1} + L_{\sigma 12}} = \frac{U_2}{U_1}, \quad (12)$$

missä L_s on staattori-induktanssi, $L_{\sigma 12}$ on käämien välinen keskinäishajainduktanssi, $L_{\sigma s1}$ on käämin hajainduktanssi ja U_1 ja U_2 ovat käämien jännitteet. Yhtälössä 12 käämit on oletettu identtisiksi, jolloin $L_{\sigma s1} = L_{\sigma s2}$. Keskinäisinduktanssin ja staattori-induktanssin suhde voidaan mitata käämien jännitteiden suhteesta, kun toiseen käämiin syötetään jännite U_1 ja toisesta avoimesta käämistä mitataan indusoitunut jännite U_2 . Suhdeluku kertoo staattorin käämien välisestä kytkeytymisestä ja hajainduktanssin suuruudesta lukuun ottamatta magnetoimisinduktanssia. (Westerlund 2015.) Kuvassa 3 nähdään kaksinapaisen moottorin käämien periaatteellinen asettelu urituksiin 0 ja 30 asteen vaihe-erolla jäniteistämättömänä ja jäniteistettynä. Ensimmäisen käämiryhmän vaiheet ovat a_1 , b_1 ja c_1 sekä toisen käämiryhmän vaiheet ovat a_2 , b_2 ja c_2 .



Kuva 3. Kaksinapaisen ja 12 uraisen koneen käämien asettelu 0 ja 30 asteen vaihe-erolla jäniteistämättömänä (a) ja (c) sekä 5/6 jäniteistyksellä (b) ja (d). Muokattu lähteestä Heinonen 2018: 14–16.

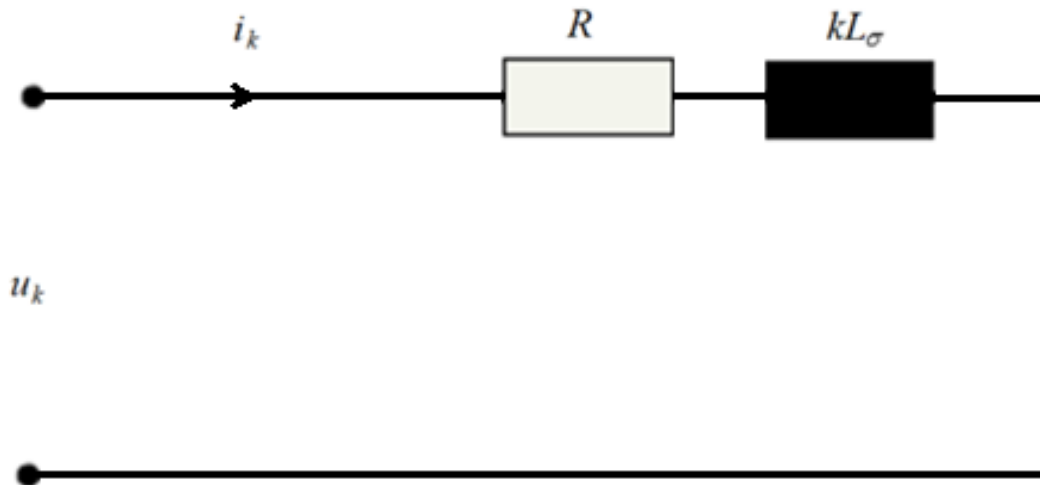
Taulukossa 1 on nähtävissä käämien välisen keskinäisinduktanssin suhde staattorin hajainduktanssiin käämien välisellä 0 ja 30 asteen vaihe-erolla jänteistettämättömänä sekä 5/6-jänteistyksellä.

Taulukko 1. Keskinäisinduktanssin suhde staattori-induktanssiin (Heinonen 2018: 20).

Vaihesiirto (°)	Jänteistämätön	5/6-jänteistys
0	0,51	0,33
30	0,22	0,53

Suuri suhdeluvun arvo kertoo voimakkaasta keskinäisinduktanssista ja pienestä hajainduktanssista. Pieni suhdeluku vastaavasti tarkoittaa pientä keskinäisinduktanssia ja suurta hajainduktanssia. Magneettinen kytkeytyminen on suurimmillaan, kun jokaisessa urassa on kummankin käämiryhmän vaiheita (kuvat 2a ja 2d). Tällöin kytkeytyminen tapahtuu sekä samassa urassa olevien käämien, että vierekkäisten urien käämien keskinäishajainduktanssin välityksellä. Kun urat sisältävät vain saman käämiryhmän vaiheita, niin vain vierekkäisten urien keskinäishajainduktanssi kytkee käämit magneettisesti toisiinsa, kun magnetoimisinduktanssi jätetään huomiotta. Taulukosta 1 nähdään, että käämien asettelulla 30 asteen vaihe-erolla käämien välinen magneettinen kytkeytyminen on pienimmillään.

Kun käämiryhmät asetetaan 30 asteen sähköiseen vaihesiirtoon, niin silloin kumotaan il-maväli-vuon kertaluvun $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5$, jne. yliaallot. Toisaalta kaksikämmimootorin yksittäisten käämien vakoluku on vain puolet kolmivaiheiseen koneeseen verrattuna. Tällöin käämikertoimet ovat korkeat 5. ja 7. järjestysluvun yliaalloille ja niitä suodattaa vain staattorin suhteellisen pieni staattorin hajainduktanssi. (Kanerva, Toivanen, Sario & Arshad 2008.) Hajainduktanssi ei ole kuitenkaan vakio, vaan pienenee dynamolevyn kyllästymisen ja virranahdon seurauksena. Yliaaltojen suuruuteen vaikuttavat myös urien muoto sekä epätasainen il-maväli-vuon. Kuvassa 4 on esitetty yksinkertaistettu sijaiskytkentä $k = 6n \pm 1$ harmonisille virroille, $n = 1, 3, 5$, jne.



Kuva 4. Sijaiskytkentä $k = 6n \pm 1$ harmonisille virroille, $n = 1, 3, 5$, jne. Muokattu lähteestä Burzanowska, Sario, Stulz & Joerg 2007.

Taulukossa 2 on esitetty käämien sijoittelun vaikutusta kaksikämmimoottorin ominaisuuksiin kuvassa 3 esitetyissä kytkennöissä.

Taulukko 2. Käämien eri asetteluiden vaikutukset moottorin ominaisuuksiin (Heinonen 2018: 59).

Ominaisuus	Jänteistämätön		5/6-jänteistys	
	YY30	YY00	YY30	YY00
5. ja 7. virran yliaalto	-	-	+	+
6. vääntömomentin yliaalto	+	-	+	-
Keskinäisinduktanssin suuruus	+	-	-	=
Hajainduktanssin suuruus	+	-	-	=

+ merkki tarkoittaa ominaisuudeltaan keskiarvoa parempaa.

– merkki tarkoittaa ominaisuudeltaan keskiarvoa heikompaa.

= merkki tarkoittaa ominaisuudeltaan keskiarvoista.

Taulukosta nähdään, että parhaat asettelut ovat jänteistämätön YY30 ja jänteistetty YY00. Jänteistyksellä voidaan vähentää 5. ja 7. yliaallon esiintyvyyttä molemmilla asetteluilla, mutta silloin käämiryhmiä välinen kytkentä voimistuu ja molemmilla käämiryhmillä on yhteisiä uria. Yhteiset urat ovat ongelmallisia redundanttisuuden näkökulmasta, koska mahdollinen vikatilanne toisessa käämissä vahingoittaa todennäköisimmin molem-

pia käämityksiä samanaikaisesti, kun taas omiin uriin sijoitetut käämitykset mahdollistavat toisen käämiryhmän toiminnan ainakin väliaikaisesti riippuen kuitenkin siitä millainen vika toiseen käämitykseen on syntynyt. Riski molempien käämien vahingoittumiseen on kuitenkin aina olemassa, koska vyyhdenpäissä käämit ovat kosketuksissa toisiinsa.

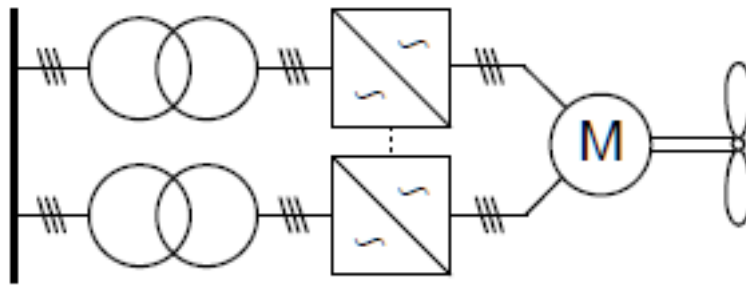
2 REDUNDANTTINEN KÄYTTÖ SÄHKÖISESSÄ PROPULSIOSSA

Sähköjärjestelmissä luotettavuus ja turvallisuus arvostetaan korkealle ja tämän vuoksi redundanttisuus on nykyään erityisesti meriteollisuudessa enemmän sääntö kuin poikkeus (London: IMC A. 2015). Redundanttisuus on laajasti käytössä laivojen propulsiossa, mutta sitä on hyödynnetty jo aiemminkin muissa sovelluksissa, kuten nosturi- ja hissi-käytöissä.

2.1 Redundantti propulsiojärjestelmä

Laivan sähköinen propulsiojärjestelmä koostuu sähköntuotannosta, siirtokaapeleista, kiskostoista, suojaus- ja kytkinkaapeista muuntajista, taajuusmuuttajista sekä moottoreista. Redundanttisuus muodostuu järjestelmän rinnakkaisista komponenteista, jotka mahdollistavat propulSION jatkumisen, vaikka vikatilanteessa yksi tai useampi komponentti menetettäisiin. Laivojen propulsiojärjestelmien redundanttisuudella pyritään lisäämään systeemin luotettavuutta ja käytettävyyttä. Käytettävyyden lisääminen on kuitenkin tasapainoilua redundanttisuuden ja järjestelmän yksinkertaisuuden välillä. Yksinkertainen järjestelmä sisältää vain vähän komponentteja ja on edullinen, mutta vikatilanteessa vaarana on propulSION menetys. Suurempi käytettävyys toisaalta tarkoittaa suurempaa redundanttisuutta, jolloin järjestelmän monimutkaisuus ja arvokkaiden komponenttien määrä kasvavat. Suuri määrä komponentteja tarkoittaa suurempaa todennäköisyyttä, että jokin yksittäinen komponentti vikaantuu. (Kanerva & Hansen 2009)

Rinnakkaiset komponentit voivat olla passiivisia ja kytkettävissä mukaan propulsioon vikatilanteessa, mutta ekologisempi ratkaisu on käyttää rinnakkaisia komponentteja aktiivisesti osana propulsiota (Kanerva & Hansen 2009; Reusser & Young 2016). Tätä ratkaisua käytetään myös tässä työssä tutkittavassa moottorissa, jonka käämiryhmät sijaitsevat omissa urissaan ja osallistuvat tasapuolisesti tehon tuottoon. Kuvassa 5 on esitetty erään propulsiojärjestelmän periaatekuva ja sen keskeiset komponentit.

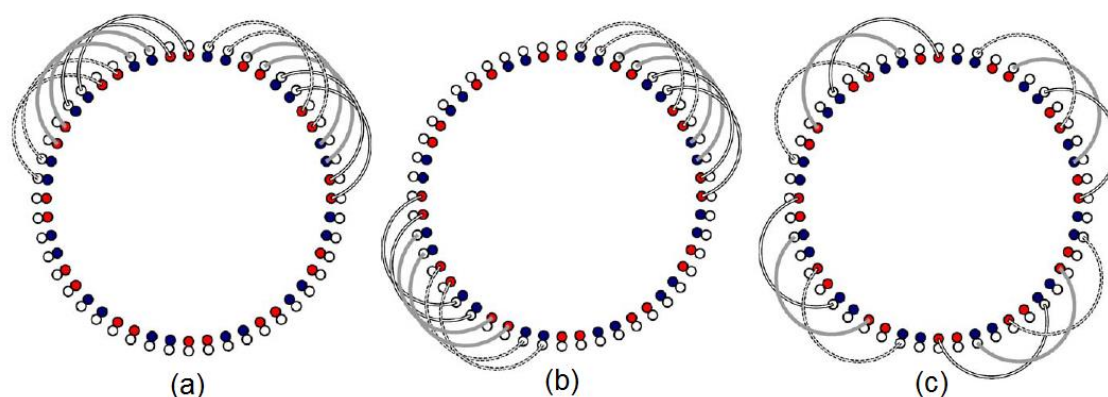


Kuva 5. Kiskosto, muuntajat, taajuusmuuttajat ja kaksikäminen propulsiomoottori (Kanerva & Hansen 2009).

Redundanttisen propulsiojärjestelmän perusvaatimuksena on 50 % propulsiotehon tuotto yksittäisen vian sattuessa, jotta taataan turvallinen ja luotettava kuljetus sekä ihmisille että materiaaleille (Reusser & Young 2016). Mahdollisia yksittäisiä vikoja propulsiomoottoriin ja sen ohjaukseen liittyen ovat esimerkiksi toisen käämiryhmän vika, taajuusmuuttajan vikaantuminen sekä epäsymmetrinen syöttö käämiryhmien välillä.

Mikäli tähteen kytketyn kolmivaiheisen moottorin tai taajuusmuuttajan yksi vaihe katkeaa, on jäljelle jääneiden vaihevirtojen ohjaaminen pyörivän magneettikentän luomiseksi mahdotonta ilman tähtipisteen nollatasoa ja erillisiä DC-piirejä. Tilanne on sama kaksikämimoottorissa, jossa on kaksi erillistä kolmivaiheista käämiryhmää, joilla on galvaanisesti erotetut tähtipisteet. Erillisiä käämejä ohjataan omilla taajuusmuuttajillaan, jolloin puhutaan käämien erillissäädöstä. Mikäli yksi tai useampi saman käämiryhmän vaiheista katkeaa, niin koko käämiryhmä pudotetaan pois käytöstä. Kaksikämimoottori voi kuitenkin jatkaa toimintaansa yhdellä käämiryhmällä ilman muutoksia ohjauksen algoritmeissa. (Levi, Bojoi, Toliyat & Williamson 2007). Tämä on yksinkertaisin tapa hallita monikertaisten kolmivaihemoottorien vikatilanteita ja täysin toimiva ratkaisu laivojen propulsiosovelluksissa.

Alberti ja Bianchi tutkivat kaksikämimoottorin staattorikäimitysten asettelun vaikutuksia moottorin ilmapälin yliaaltoihin ja kuormitettavuuteen vikatilanteissa. Vikatilanteet olivat avoin käämiryhmä ja oikosuljettu käämiryhmä. Kuvassa 6 on esitetty vikatilanteissa käytetyt asettelut yhdellä käämiryhmällä.



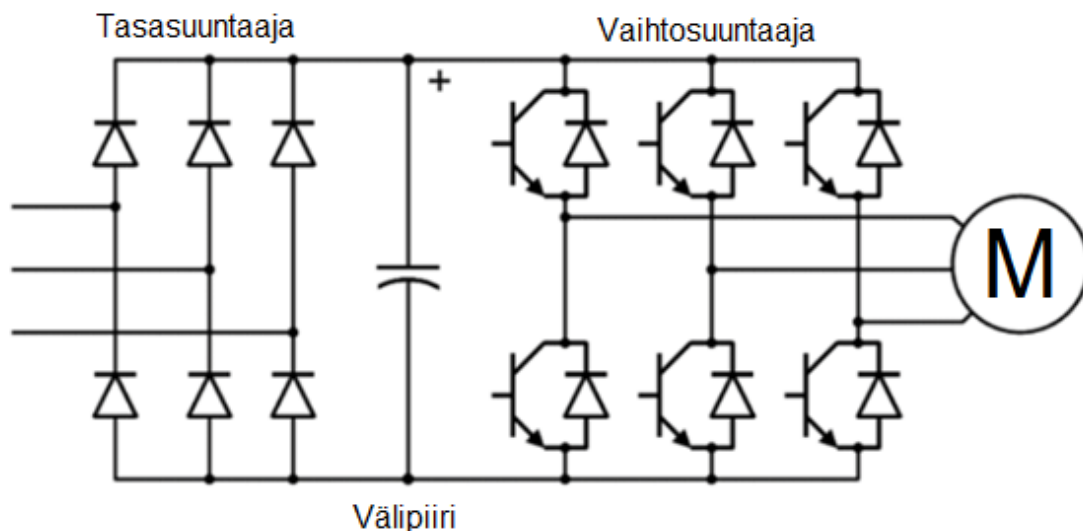
Kuva 6. Yhden käämin epäsymmetrinen asettelu (a) ja (b) sekä symmetrinen asettelu (c) vikatilanteissa. Muokattu lähteestä Alberti & Bianchi 2011.

Tutkimuksesta käy ilmi, että kuvan 6 asetteluiden (a) ja (b) magnetomotorisen voiman yliaaltosisältö on huomattavasti korkeampi kuin asettelun (c). Tämä johtuu käämien epäsymmetrisestä asettelusta staattorin urituksiin. Epäsymmetrisen asettelun vuoksi harmonisten komponenttien amplitudi on aikasidonnainen ja vaihevirratt ovat epäsymmetrisiä, jolloin syntyy vastakkaissuuntaan pyörivä magneettikenttä. Korkeat mmv-yliaallot ja epäsymmetriset komponentit kuvan 6 asetteluissa (a) ja (b) vähentävät moottorin kuormitettavuutta toisen käämiryhmän ollessa avoimena. Tässä vikatilanteessa paras kuormitettavuus ja hyötysuhde ovat symmetrisellä asettelulla (c), jota käytetään myös tämän työn protomoottorissa. (Alberti & Bianchi 2011.)

Symmetrisellä asettelulla käämien välinen magneettinen kytkeytyminen on kuitenkin suurta, koska molemmat käämiryhmät jakavat yhteisen magneettipiirin. Asetteluissa (a) ja (b) käämiryhmät sijaitsevat magneettipiirin eri osissa ja kytkeytyminen on heikompaa. Vikatilanteessa, jossa toinen käämiryhmä on oikosuljettu, indusoituu vikaantuneeseen käämiryhmään jännite ja siten alkaa kulkea virta. Virta kasvaa myös vikaantumattomassa käämissä ja moottori lämpenee voimakkaasti. Asetteluissa (c) käämiryhmien välinen kytkeytyminen on voimakasta ja siten myös virrat suuria, joten moottori lämpenee nopeasti yli moottorin maksimilämpenemän eikä tätä asettelua voida käyttää toisen käämiryhmän ollessa kolmivaiheisessa oikosulussa. Asetteluissa (a) ja (b) magneettinen kytkeytyminen on heikompaa ja niillä voidaan tuottaa 50 %:n propulsioteho oikosulkutilanteessa moottorin lämpenemän rajoissa. (Alberti & Bianchi 2011.)

2.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajalla muutetaan sisään tulevan vaihtojännitteen ja taajuuden suuruutta joko samanaikaisesti tai erikseen. Taajuusmuuttaja mahdollistaa moottorin mekaanisen tehon säätämisen tarkasti ja energiatehokkaasti. Välipiirilliset taajuusmuuttajat jaetaan virta- ja jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin sen perusteella varastoidaanko energia välipiirissä kuristimiin vai kondensaattoreihin. Välipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Kuvassa 7 on esitetty jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan päävirtapiirin rakenne ja komponentit.



Kuva 7. Taajuusmuuttajan päävirtapiirin rakenne ja komponentit.

Tasasuuntaaja suuntaa verkon vaihtojännitteen tasajännitteeksi puolijohdekomponenttien avulla. Tasasuuntaukseen on tyypillisesti käytetty tehodiodeja, jotka johtavat virtaa vain yhteen suuntaan. Tasasuuntaukseen voidaan käyttää myös tehotyristoreja, joilla voidaan tarvittaessa syöttää virtaa myös välipiiristä verkkoon päin tai säätää välipiirin jännitteen suuruutta. Välipiirissä energia varastoidaan kondensaattoreihin, joiden tehtävänä on tasoiittaa tasasuunnatun jännitteen muotoa. Vaihtosuuntauksessa välipiirin korkeampi ja matalampi potentiaali kytketään kuormalle vaihtosuuntaajan kytkinten avulla. Kytkin-komponentteina käytetään vaihtosuuntauksessa enimmäkseen IGB-transistoreja. Kytkinten ohjauksen periaatteena on, että vain toinen saman haaran kytkimistä johtaa kerrallaan.

Kytkinten ohjauksella vaikutetaan syntyvän jännitteen taajuuteen ja jänniteportaiden lukumäärään ja leveyteen. Kytkinten ohjaukseen käytetään tyypillisesti pulssinleveysmodulaatiota PWM (eng, pulse width modulation) tai suoraa momenttisäätöä DTC (eng, direct torque control).

2.2.1 Redundanttisen syötön vaikutukset matalataajuisiin yliaaltoihin

Vaihtosuuntaajan syöttämän jännitteen harmoniset yliaaltokomponentit vaikuttavat magneettivuon muodostumiseen ja moottorin yliaaltoihin. Jännitteen harmoniset yliaallot muodostavat käämitykseen yliaaltovirtoja, joiden amplitudi riippuu käämin resistanssista ja yliaallon taajuutta vastaavasta yliaaltoreaktanssista. (Vesala 2010: 38.) Taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden ollessa useita tuhansia hertsejä syöttöjännite ei sisällä runsaasti järjestyslukua $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5$, jne. yliaaltoja, ja suurin syy kaksikämmimoottorin staattorivirran matalataajuisiin yliaaltoihin on koneen rakenne (Karttunen, Kallio, Peltoniemi, Silventoinen, & Pyrhönen 2012). Rakenteesta johtuvia yliaaltoja rajoittaa vain suhteellisen pieni hajainduktanssi ja pienikin yliaaltojen lähde aiheuttaa staattorikäämeihin suuria harmonisia virtoja kyseisille järjestyslukuille. Toisaalta nämä rakenteesta johtuvat yliaallot ovat suurempi ongelma kestoplaneettimoottorissa kuin oikosulkumoottorissa (Karttunen, Kallio, Peltoniemi, Silventoinen, & Pyrhönen 2012).

2.2.2 Redundanttisen syötön vaikutukset korkeataajuisiin yliaaltoihin

Redundanttinen syöttö voidaan toteuttaa yksinkertaisella erillissäädöllä, jossa taajuusmuuttajat syöttävät itsenäisesti omia käämiryhmiään. Erillissäädössä kaksikämmimoottori mallinnetaan kolmivaiheisen moottorin yhtälöillä, eikä siinä huomioida käämien keskinäistä kytkeytymistä. Moottoria ajetaan momenttiohjeella, jolloin molemmat taajuusmuuttajat saavat puolet kokonaismomenttiohjeesta. Syötettäessä kaksikämmimoottoria kahdella erillissäädetyllä taajuusmuuttajalla, yhden käämin mitattu virta sisältää käämiin syötetyn virran ja toisesta käämistä indusoituneen jännitteen aiheuttaman virran. Erillissäädetyt taajuusmuuttajat eivät kykene erottamaan syötettyä virtaa indusoituneesta virrasta. Tämä johtaa siihen, että taajuusmuuttajat häiritsevät omilla ohjauksillaan toisiaan

ja syntyy korkeataajuisia yliaaltoja, jotka kiertävät keskinäisen hajainduktanssin kautta taajuusmuuttajien ohjaamien käämitysten välillä aiheuttaen ylimääräisiä rautahäviöitä.

Käyttämällä vektoriavaruushajotelmaa aliavaruuden (μ_1, μ_2) yliaaltoja voidaan suodattaa pois, syöttämällä moottoriin vastakkaisia saman taajuisia komponentteja (Zhao & Lipo 1995). Toinen tapa on käyttää virran estimointia erillissäädetyssä ohjauksessa, jossa taajuusmuuttajat eivät näe toisesta käämityksestä indusoituneiden jännitteiden aiheuttamia virtoja.

2.2.3 Erillissäätö ja virtaestimaatti

Tässä työssä kaksikämmimoottorin ohjaukseen käytetään erillissäätöä, jossa taajuusmuuttajat ohjaavat omia käämiryhmiään tavallisen kolmivaihemoottorin tavoin täysin itsenäisesti ilman keskinäistä tietojen vaihtoa. Kaksikämmimoottori mallinnetaan perinteisen kolmivaiheisen oikosulkumoottorin yhtälöillä, eikä käämiryhmien keskinäistä kytkeytymistä huomioida säädössä. Moottoria ohjataan momenttiohjeella, joka jaetaan puoliksi säätöjen kesken. Säädot osallistuvat yhteisen vuon luomiseen, jolloin myös vuo-ohje on molemmille säädöille sama. Erillissäädetyt taajuusmuuttajat mahdollistavat tasaisen tehonjaon käämiryhmien kesken. (Karttunen, Kallio, Peltoniemi, Silventoinen, & Pyrhönen 2012.)

Erillissäätöä voidaan käyttää, kun moottorin vaihemäärä on kolmivaihejärjestelmän monikerta. Erillissäätö on yksinkertainen, eikä vaadi ylimääräisiä komponentteja tavalliseen kolmivaiheiseen taajuusmuuttajakäyttöön verrattuna. Ohjaus on täysin redundanttinen lukuun ottamatta käämiryhmien keskinäistä kytkeytymistä ja toisen käämiryhmän tai taajuusmuuttajan vikaantuessa toinen käämiryhmä voi jatkaa toimintaansa. (Karttunen, Kallio, Peltoniemi, Silventoinen, & Pyrhönen 2012.)

Erillissäädössä käämiryhmien sähkömagneettinen kytkeytyminen aiheuttaa ongelmia, mikäli säädöt käyttävät mitattua virtaa. Tämän vuoksi käytetään virtaestimaattia säädön toimivuuden parantamiseksi, jolloin säädöt eivät häiritse toisiaan ja siten erillissäätö ei aiheuta moottoriin ylimääräisiä yliaaltoja. Kuvassa 8 on esitettynä lohkokaaaviot yhden

heeseen vuon estimoinnissa. Vuon estimoinnin virhe ei ole niin suuri ongelma kestopagneettimoottorissa, jossa kestopagneetit magnetoivat moottorin. Oikosulkumoottorissa käämivirrat luovat moottorin vuon, joten virhe vuon estimoinnissa aiheuttaa virheen virtaestimaattiin. Tämän vuoksi oikosulkumoottorin säätö on monimutkaisempi toteuttaa. (Kostiainen 2018: 3)

3 STAATTORIKÄÄMITYKSEN SUUNNITTELU JA SIMULOINTI

Tehtävänäni oli suunnitella kaksikääinen staattori jo valmistettuun oikosulkumoottoriin, jolloin moottorin fyysiset mitat olivat jo valmiiksi määritettyinä. Käämityksen suunnittelussa pyrittiin minimoimaan käämien välinen kytkeytyminen, rakenteesta johtuvat yliaallot ja mahdollistamaan erillisten käämiryhmiä redundanttisuus.

3.1 Staattorikäämityksen suunnittelu

Pyrhosen ym. (2014: 294) mukaan sähkömoottorin suunnittelu lähtee liikkeelle moottorin lähtöarvojen valinnasta. Näiden ohjeiden ja olemassa olevan koneen rakenteen perusteella kaksikäälimoottorille valittiin taulukon 3 mukaiset lähtöarvot.

Taulukko 3. Kaksikäämisen oikosulkumoottorin lähtöarvot.

Moottorityyppi	Oikosulkumoottori
Nimellisteho (kW)	315
Nimellispyörimisnopeus (rpm)	1489
Napaluku	4
Nimellistaajuus (Hz)	50
Nimellisjännite (V)	500
Vaiheluku	6
Momentti (Nm)	2000

Moottorissa käytettiin myös tuotantokoneen roottoria ja samaa staattorin uritusmeistä, joten ilmavälin poikkipinta-ala, staattoripaketin pituus, ilmaväli, hampaanleveys ja uramuodot määräytyivät tuotantokoneen mittojen mukaan, joten jäljelle jäi staattorikäämityksen optimointi valmiiksi valituille mitoille.

Staattorin suunnittelussa ensimmäisenä on valittava ilmavälin magneettivuon tiheyden huippuarvo B_{\max} , joka valittiin välille 0,7–0,9 T Pyrhösen ym. (2014: 298) taulukon 6.2 mukaan. Kaksikäälimoottori modifioitiin jo olemassa olevasta tuotantokoneesta, joten tehtäväkseni jäi sopivan uraluvun, käämintätavan ja rinnakkaisten haarojen määrän sekä

käämikierrosluvun valinta. Käämintätavaksi valittiin kaksikerroslimikäämitys ja kuusi-vaiheinen käämitys luotiin jakamalla kolmivaiheinen lävistäjäkäämitys kahteen osaan, jolloin vakoluku puolittui alkuperäisestä. Uraluvun valinta vaikuttaa vakoluvun suuruuteen ja siten ilmavälihuon sinimuotoisuuteen ja moottorissa syntyviin yliaaltoihin, joten 96-urainen staattori voisi olla parempi vaihtoehto suuremman vakolukunsa puitteissa, mutta 72-urainen staattori valittiin protomoottoriin, koska siinä voitiin käyttää jo valmistettua tuotantokoneen 62-uraista roottoria.

Kun moottorin staattoripaketin pituus, ilmavälin poikkipinta-ala ja ilmavälihuon tiheys ovat tiedossa, lasketaan käämikierrosten lukumäärä halutun sähkömotorisen voiman E_m muodostamiseksi. Oikosulkumoottoreilla E_m on välillä (0.93–0.98) U_s . Käämikierrosten lukumäärä lasketaan yhtälöstä

$$N_s = \frac{\sqrt{2} E_m}{\omega k_{pw} \tau_p \alpha_i B_{\max}}, \quad (13)$$

missä ω on kulmanopeus ja α_i on yhden navan vuontiheyden aritmeettisen keskiarvon suhde sen huippuarvoon. Tarvittaessa kierrosmäärä voidaan jakaa usealle napaparille, jolloin kierrokset kytketään rinnakkain. Yleensä käytetään käämikierroksien sarjankytkentää, koska siten vältetään mahdollisista napaparien epäsymmetrioista moottoriin aiheutuvat kiertovirrät. Rinnankytkentää käytetään virranahdon ja käämien kiertovirtojen vähentämiseksi. (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014:312.)

Kun kierrosmäärä on laskettu, lasketaan sopiva kokonaisluku z_Q , joka on lähimpänä laskettua kierroslukua N_s käyttäen yhtälöä

$$z_Q = \frac{2am}{Q} N_s, \quad (14)$$

missä a on rinnakkaisten haarojen lukumäärä ja m on vaihemäärä. z_Q tarkoittaa urassa olevien virrallisten johtimien lukumäärää. Tämän jälkeen lasketaan ilmavälihuon huippuarvo B_{\max} uudestaan sijoittamalla N_s yhtälöön

$$B_{\max} = \frac{\sqrt{2} E_m}{\omega k_w l' \tau_p \alpha_i N_s}. \text{ (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 317)} \quad (15)$$

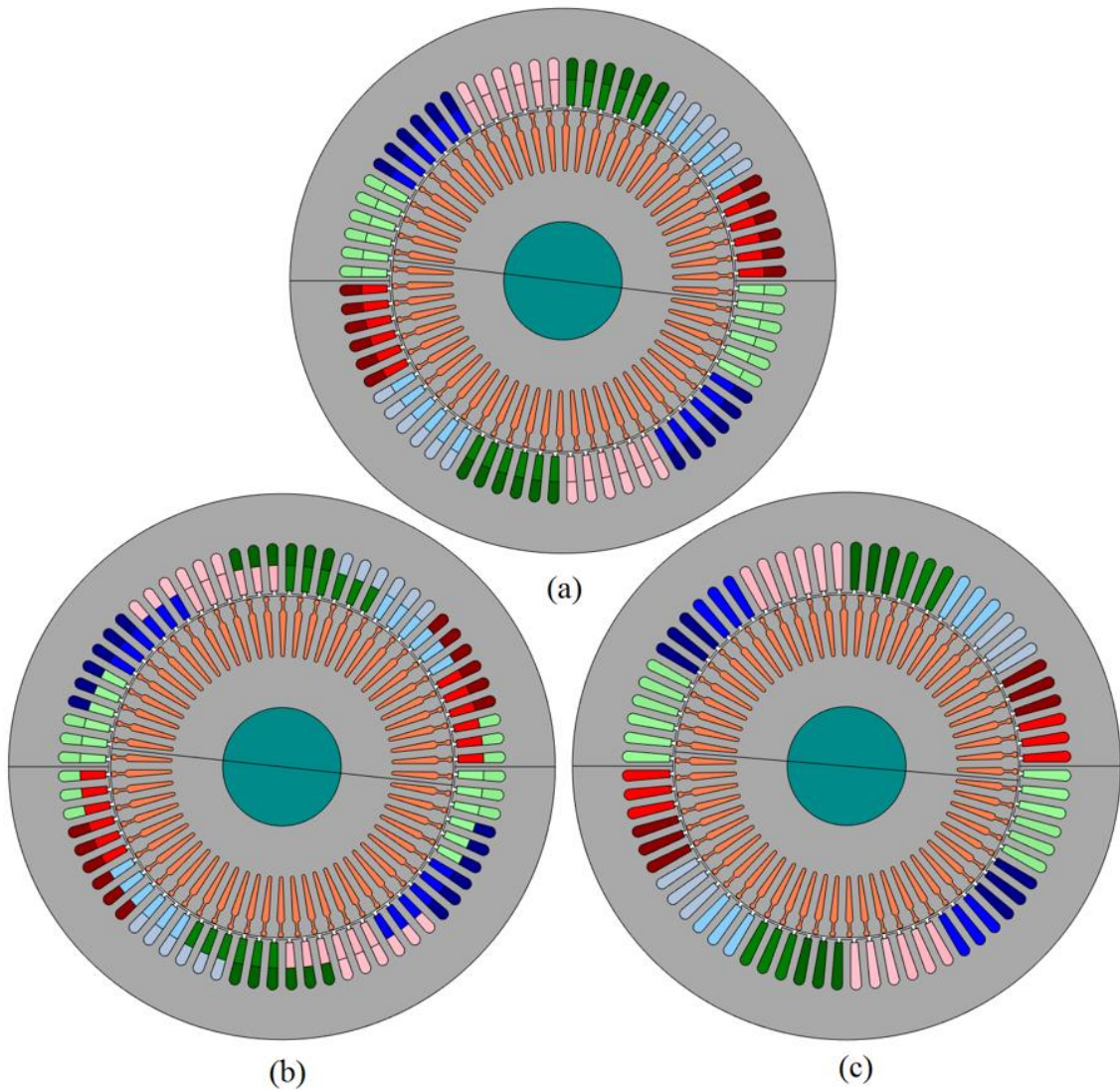
Magneettipiirin mittoihin ei tehty muutoksia, koska vuontiheydet staattorin hampaassa sekä staattorin että roottorin selässä asettuivat epätahtikoneissa käytettyihin tyypillisiin vuoarvoihin (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 298). Uran geometria vaikuttaa uran hajainduktanssiin ja siten staattorivirran yliaaltoihin, mutta uramuodon vaikutusta ilmeneviin yliaaltoihin ei käsitellä tässä tutkielmassa (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014: 251).

3.2 Simulointitulokset

Kaksikäämimoottori mallinnettiin elementtimenetelmään perustuvalla Fcsmek-ohjelmalla, joka on eräs Adept-laskentaohjelman aliohjelmista. Mallin CAD-geometria koostuu elementeistä ja menetelmän tarkkuus riippuu geometrian diskretoinnista. Suuri määrä elementtejä parantaa laskennan tarkkuutta, mutta kasvattaa laskenta-aikaa ja tarvittavaa laskentatehoa. Tiheää elementtiverkkoa onkin syytä käyttää laskennan tarkkuuden kannalta oleellisimmilla alueilla, kuten moottorin ilmapälin läheisyydessä. (Arkkio 1987: 24–25.)

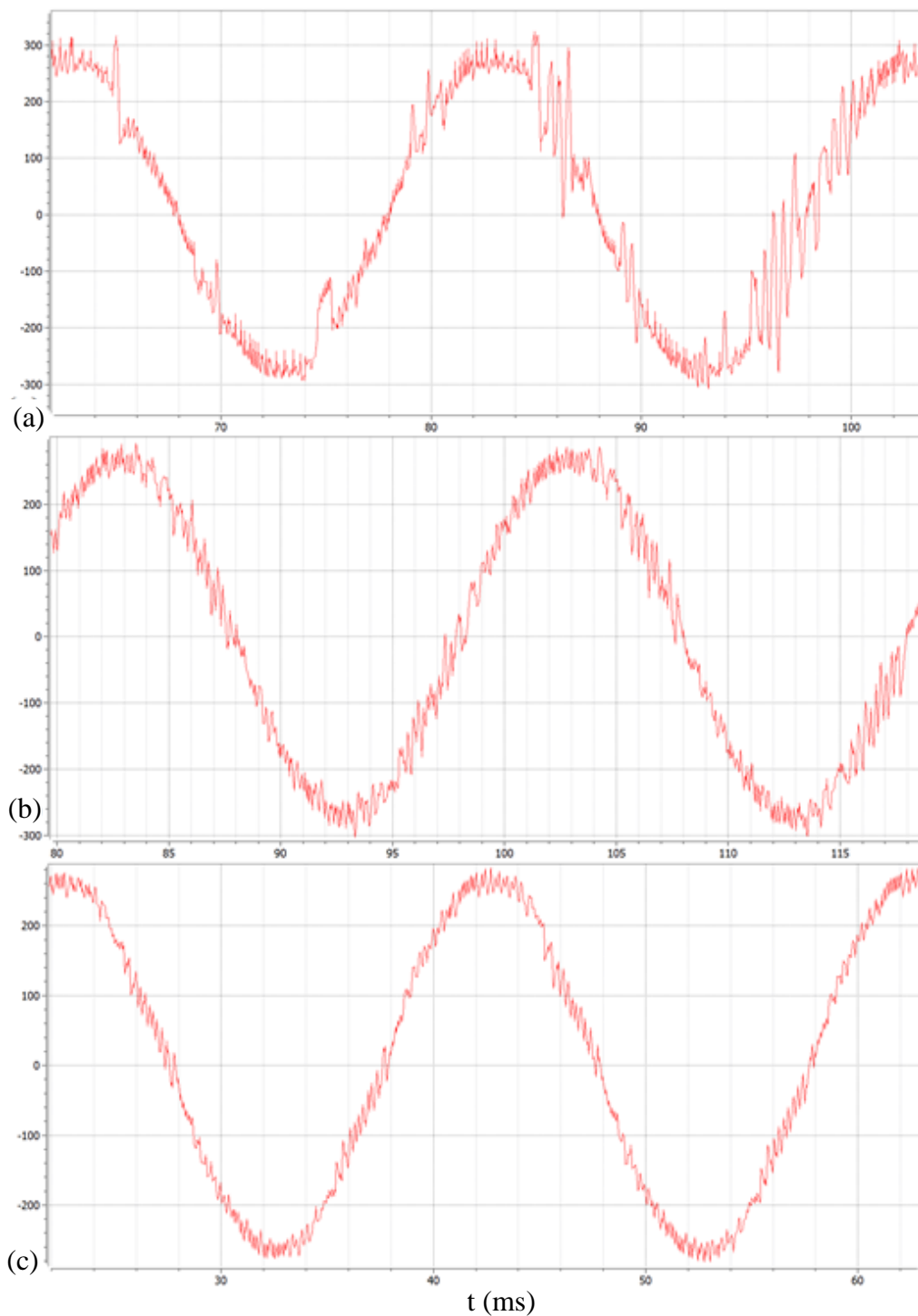
3.2.1 Käämien asettelutapojen vertailu

Kaksikäämimoottorin toimintaa mallinnettiin kahden taajuusmuuttajan syötöllä käämien epäsymmetrisellä asettelulla YY30 ja symmetrisellä asettelulla YY00. Symmetrisissä asetteluissa YY00 ja YY60 laskentatulokset ovat identtiset. YY00-asettelu mallinnettiin jänteistämättömänä ja 5/6-jänteistyksellä. Laskentamallissa eri kytkentöjä syötettiin taajuusmuuttajalla 3 kHz kytkentätaajuudella Simple 2-level DTC -säädöllä. Virran perusaallon suuruus kaikissa kytkennöissä on noin 213 A ja taajuus 50 Hz. Kuvassa 9 on esitetty käämien asettelu eri kytkennöissä.



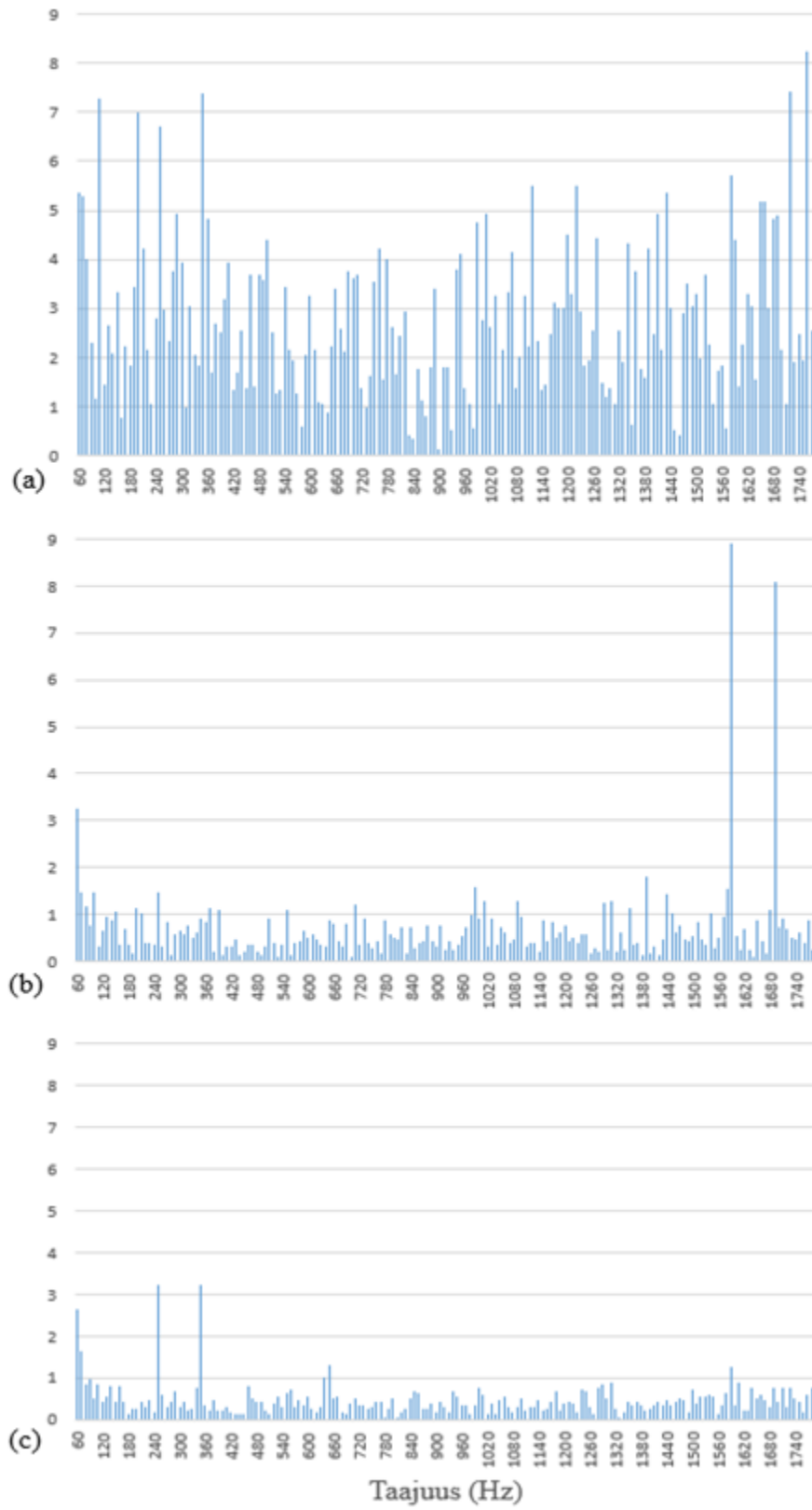
Kuva 9. Käämien asettelu kytkennässä YY00 (a), YY00 5/6-jänteistyksellä (b) ja YY30 (c).

Jokaista vaihetta kuvataan eri värillä ja kuvasta nähdään, että YY00-asettelussa molemmat käämit jakavat samoja uria, mutta YY30-asettelussa käämit sijaitsevat omissa urissaan. Kuvassa 10 on esitetty eri kytkentöjen simuloitut käämivirrät ja kuvassa 11 vastavien virtojen harmoniset komponentit eri taajuuksilla.



Kuva 10. Simuloidut käämvirrat kytkennöissä YY00 (a), YY00 5/6-jänteistyksellä (b) ja YY30 (c). Virrat ovat ampeereina.

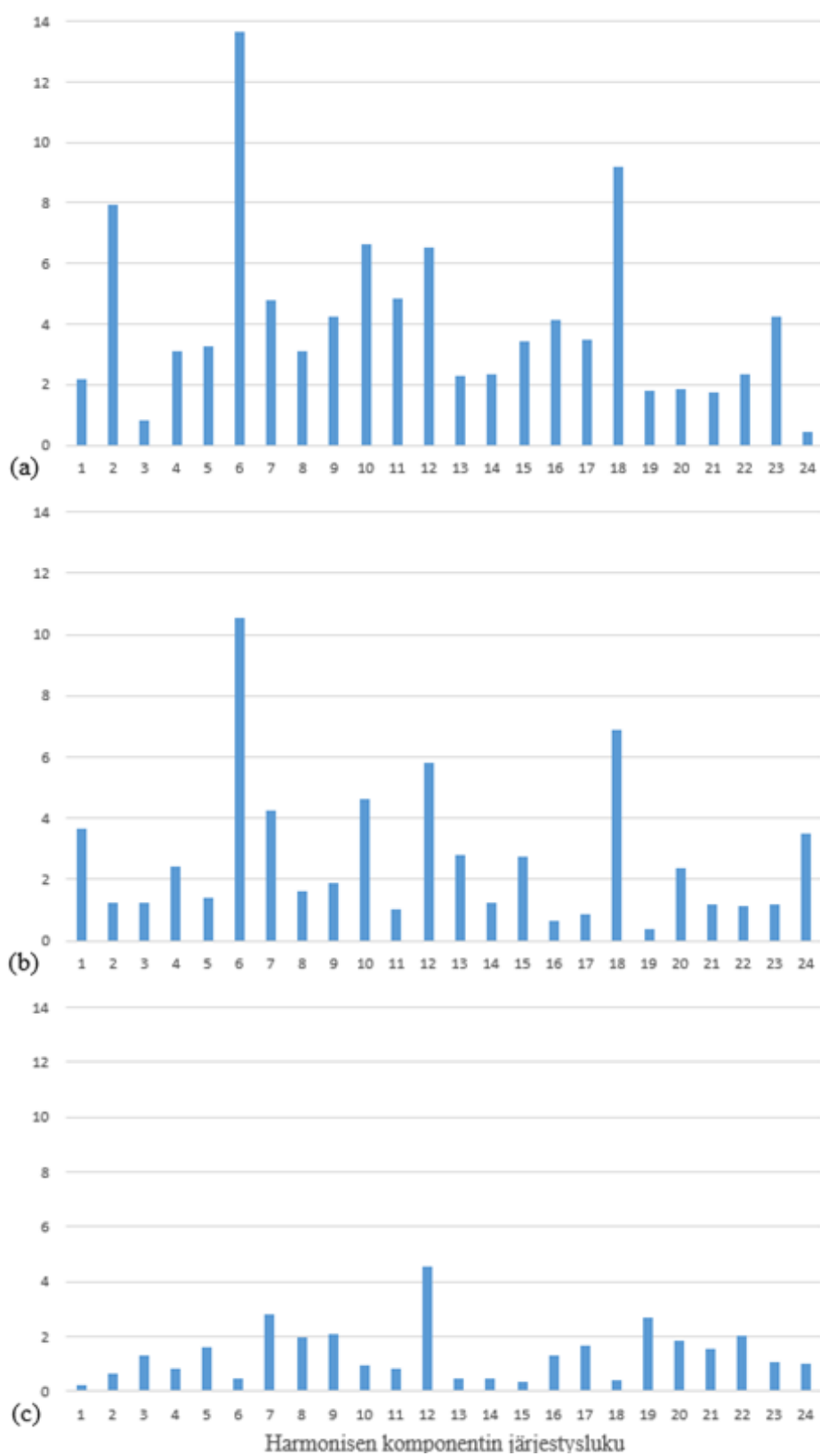
Kuvasta 10 nähdään, että eniten rippeliä virrassa on kytkennässä YY00 ja vähiten kytkennässä YY30. YY00-kytkennän virran rippeli pienenee huomattavasti 5/6-jänteistyksellä.



Kuva 11. Simuloidut käämivirran harmoniset komponentit kytkennöissä YY00 (a), YY00 5/6-jänteistyksellä (b) ja YY30 (c). Pystyakselilla esitetyt virrat ovat ampeereja.

Kuvasta 11 nähdään, että YY00-kytkennässä virta sisältää runsaasti korkeita matalataajuisia yliaaltokomponentteja. Jänteistämällä virran yliaaltosisältö pienenee huomattavasti ja 5/6-jänteistyksellä voidaan pienentää erityisesti 5- ja 7-järjestysluvun yliaallon suuruutta, mutta tällöin suuret yliaaltokomponentit syntyvät järjestysluville 32 ja 34. Kytkenässä YY30 virta sisältää hieman suuremmat 5- ja 7-järjestysluvun yliaallot kuin jänteistetty YY00, mutta suuria järjestysluvun 32 ja 34 yliaaltoja ei kuitenkaan esiinny ja tämän vuoksi virran särö on pienempi.

Kuvassa 12 on esitetty lasketut moottorin vääntömomentin harmoniset komponentit eri asetteluilla. Ilmavälivuon aikasidonnaista taajuuskomponenttia on modifioitu korottamalla se toiseen potenssiin, jolloin vääntömomentin perusaalto on järjestyslukua nolla (Madinabeita: 8). Vääntömomentin perusaalto on kaikissa asetteluissa noin 2000 Nm.



Kuva 12. Simuloidut vääntömomentissa esiintyvät harmoniset komponentit kytkennöissä YY00 (a), YY00 5/6-jänteistyksellä (b) ja YY30 (c). Pystyakselilla esitetyn momentin yksikkö on Newtonmetri.

Tarkastellaan seuraavaksi ilmavälivuota. YY00-kytkennöissä ilmavälivuossa esiintyy runsaasti yliaaltoja ja suuret kuudennen kertaluvun vääntömomentin värähtelyt. YY30-kytkennässä ilmavälivuo on sinimuotoisempi, koska siinä ei esiinny kertaluvun $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5$ jne. yliaaltoja. Tällöin yliaaltokomponenttien aiheuttamat roottorin kuparihäviöt ja kertaluvun $k = 6n$, $n = 1, 2, 3$ jne. vääntömomentin värähtelyt pienenevät huomattavasti. (Singh, Nam & Lim 2005.)

3.2.2 Johtopäätökset käämien asettelutavoista

Taulukossa 4 on esitetty kaksikämmimoottorin virran ja momentin kokonaissäröt käämien erilaisilla asetteluilla. Laskentatuloksista nähdään, että ne vastaavat aikaisemmin tutkituja taulukon 2 tuloksia.

Taulukko 4. Lasketut virran ja momentin kokonaissäröt erilaisilla käämien asetteluilla.

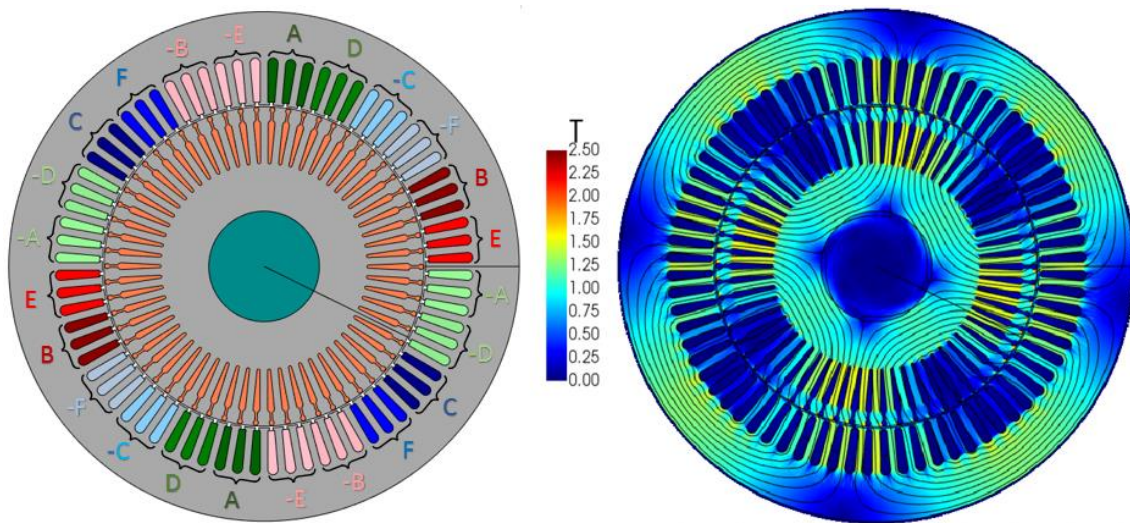
THD	YY00	YY00 5/6-jänteistys	YY30
i (%)	22,5	9,1	6,5
T (%)	4,3	3,6	2,9

Laskentatuloksista voidaan päätellä, että huonoin mahdollinen asennelu on symmetrinen jänteistämätön kytkentä. Jänteistämällä symmetrisen asennelun virran yliaaltosisältö pienenee paljon, jolloin symmetrisen ja epäsymmetrisen asennelun virtojen kokonaissäröt ovat lähellä toisiaan. Epäsymmetrisen asennelun etuna on kuitenkin sinimuotoisempi ilmavälivuo ja vähäisempi vääntömomentin värähtely. Lisäksi käämit sijaitsevat omissa urissaan, jolloin mahdollisuus molempien käämien yhtäaikaaiselle vikaantumiselle yhden käämin vikatilanteessa on mahdollisesti pienempi. Tutkimustietoa tästä ei kuitenkaan vielä ole olemassa, joten varmoja johtopäätöksiä ei voida tehdä.

Laskentatulosten mukaan moottorin häviöt sekä virran että momentin kokonaissäröt ovat saman suuruiset sekä tähteen että kolmioon kytkettynä. Tähtikytkennän etuna on kuitenkin syöttökaapeleissa kulkeva pienempi virta, joten syöttöön voidaan valita virtakestoisuudeltaan pienemmät kaapelit ja taajuusmuuttajat.

3.2.3 Kuusi- ja kolmivaiheisen moottorin laskentatulosten vertailu

Aikaisempiin tutkimuksiin ja laskentatuloksiin perustuen protomoottorin kytkennäksi valittiin YY30. Kuvassa 13 on esitetty staattorikäämien asettelu 30 asteen vaihesiirrolla toisiinsa nähden ja käämityksen luoma nelinapainen pyörivä magneettikenttä.



Kuva 13. Kaksikäminen oikosulkumoottori käämien asettelulla YY30 ja vastaava käämityksen 4-napainen magneettikenttä.

Kaksikämimoottorin prototyypissä jokaisessa vaiheessa on kaksi rinnakkaista haaraa ja kaikkien osakäämien päät on tuotu liitäntäalustalle, jolloin ulostuloja on yhteensä 24 kpl. Kytkennästä riippuen osakäämit voidaan kytkeä sarjaan tai rinnan. Moottori voidaan kytkeä kolmi- ja kuusivaiheiseksi kytkentöihin YY30 ja 2D. 2D-kytkennässä osakäämit on kytketty sarjaan, jolloin moottorin nimellisjännite on suurempi. Kuvassa 14 nähdään valmistetun kaksikämimoottorin ulostulot ja liitäntäalusta.



Kuva 14. Kaksikäämimoottorin ulostulot ja liitäntäalusta.

Moottorin suoritusarvot lasketaan ja mitataan sekä kolmi- että kuusivaiheisena vertailun vuoksi, jolloin kolmivaiheinen kytkentä toimii vertailukohtana YY30-kytkennälle lasket-
tujen ja mitattujen arvojen vertaamiselle keskenään. YY30- ja 2D-kytkennän suoritusar-
vot laskettiin sinimuotoisella ja taajuusmuuttajan tuottamalla jännitteellä, jolloin nähdään
kaksikäämimoottorin rakenteesta johtuvat yliaallot sekä taajuusmuuttajan aiheuttamat
yliaallot. Nämä tulokset ovat nähtävissä taulukossa 5.

Taulukko 5. Kaksikäämimoottorille lasketut arvot kuusivaiheisena YY30-kytkennässä ja kolmivaiheisena 2D-kytkennässä sinimuotoisella ja taajuusmuuttajasyötöllä.

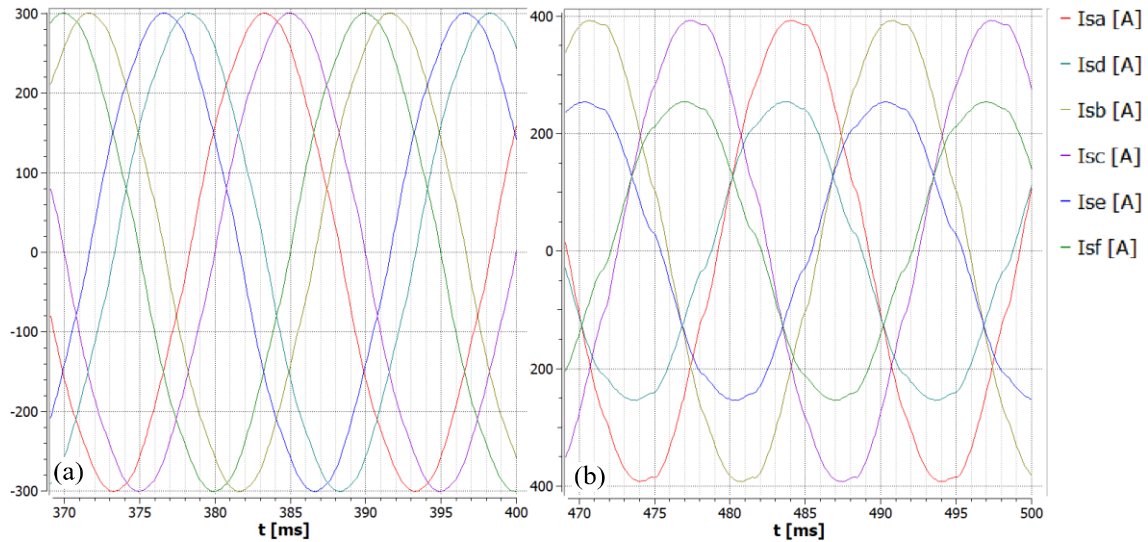
Kytkenä	YY30		2D	
Syöttötapa	Sinimuotoinen	DTC	Sinimuotoinen	DTC
Taajuus (Hz)	50	50	50	50
Jännite (V)	500	468,1	600	561,7
Virta (A)	213	194,8	363,3	330
Tehokerroin	0,87	0,78	0,86	0,78
n(rpm)	1489	1490	1490	1491
Momentti (Nm)	2017	1809	2018	1816
Akseliteho (kW)	314,5	282,3	315	283,6
Ilmavälin vuontiheys (T)	0,723	0,69	0,77	0,74
Lämpenemä θ_{cu_120} (K)	65,2	65,2	69	69,2
Moottorin hyötysuhde (%)	97	96,7	96,9	96,6
Moottorivirran THD (%)	1,49	6,5	2,27	6,8
Vääntömomentin THD (%)	0,34	2,86	2,25	4,34

Laskentatuloksista nähdään, että YY30-kytkennässä kaksikäämisen oikosulkumoottorin rakenne ei aiheuta virtaan suuria matalataajuisia yliaaltokomponentteja ja Taajuusmuuttajasyötöllä virran kokonaissäröt ovat lähes yhtä suuria molemmissa kytkennöissä. Mikäli taajuusmuuttajasyötöllä vaihevirtojen välinen kulma pysyy käämityksen asetteluun nähden oikeassa kulmassa ja taajuusmuuttajat ovat täysin häiriintymättömiä toistensa tekemistä kytkennöistä, niin kaksikäämimoottorin moottorivirran kokonaissärö ei ole korkeampi, kuin yhdellä taajuusmuuttajalla syötetyn 3-vaiheisen moottorin. Taajuusmuuttajaa syötetään YY30-kytkennässä 500 V:n jännitteellä ja 2D-kytkennässä 600 V:n jännitteellä.

3.2.4 Virtatasapaino kaksikäämimoottorissa

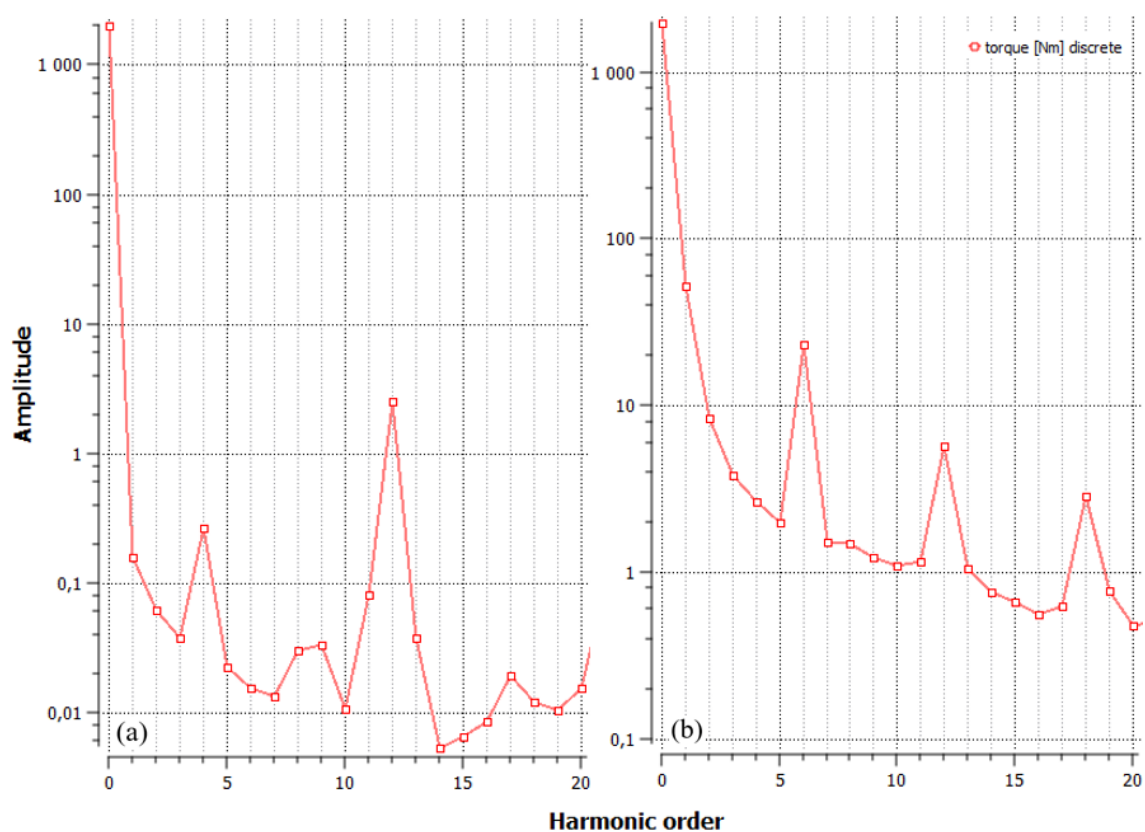
Ideaalitalanteessa molemmat käämit osallistuvat tasaisesti tehontuottoon, mutta virtojen epätasapainoa aiheuttaa staattorikäämien ja taajuusmuuttajien luonnollinen epäsymmetria sekä erisuuriset syöttöjännitteet. Erillissäädössä molempien käämien virtoja ohjataan itsenäisesti omilla momenttiohjeillaan, joten virrat asettuvat automaattisesti tasapainoon.

(Bojoi, Farina, Lazzari, Profumo & Tenconi 2003). Kaksikämmimoottorin toimintaa mallinnettiin normaalitilanteessa ja tilanteessa, jossa toisen käämin kolmivaihesyötön jännitteet olivat 90 % nimellisestä 500 V jännitteestä, jotta nähtäisiin mitä vaikutuksia virtojen epätasaisella jakautumisella on. Kuvassa 15 ovat moottorin virrat ideaalisessa tilanteessa sekä virtojen epätasapainossa.



Kuva 15. Kaksikämmimoottorin virrat normaalitilanteessa (a) ja epätasapainossa (b).

Erisuuret syöttöjännitteet aiheuttavat virtojen epätasapainon, jolloin toisen käämiryhmän virrat kasvavat normaalia korkeammalle. Samalla myös moottorin lämpötila nousee ja kuormitettavuus laskee. Epätasapaino voi aiheuttaa myös toisen taajuusmuuttajan vikasuojauksen laukeamisen. Kun virrat ovat tasapainossa niin molemmat käämiryhmät osallistuvat momentin tuottoon tasaisesti, mutta epäsymmetrisessä tilanteessa toinen käämiryhmä magnetoi moottorin ja toinen käämiryhmä tuottaa momentin. Tämä ilmenee kuvasta 15, josta nähdään, että virrat ovat lähes samassa vaihesiirrossa, vaikka syöttävien jännitteiden välillä on 30-asteen vaihesiirto. Kuvasta 16 nähdään vääntömomentin harmoniset komponentit virtojen tasapainossa ja epätasapainossa.



Kuva 16. Vääntömomentin harmoniset komponentit normaalitilanteessa (a) ja virtojen epätasapainossa (b).

Kaksikäsimoottorin YY30 kytkennällä pienenee kertaluvun $k = 6n$, $n = 1, 2, 3$ jne. vääntömomenttirippeli, mikäli virrat ovat tasapainossa, mutta virtojen epätasapainossa näin ei tapahdu.

4 KAKSIKÄÄMISEN OIKOSULKUMOOTTORIN MITTAUKSET

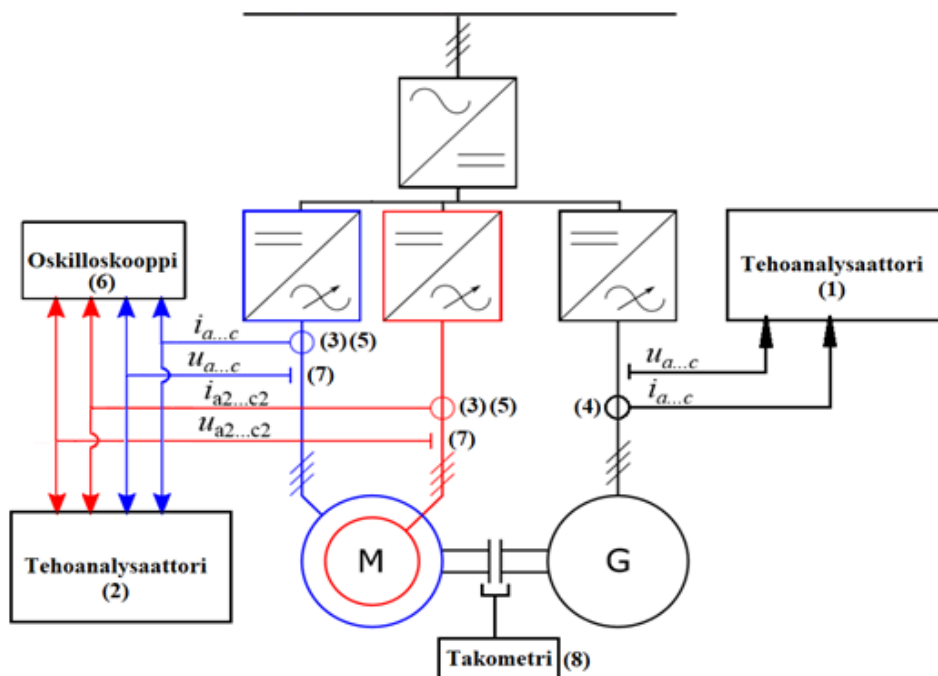
Mittauksissa tarkasteltiin käämivirran yliaaltoja YY30-kytkennässä molemmilla käämeillä ja pelkästään toisella käämityksellä. Vertailun vuoksi moottori kytkettiin kolmi-vaiheiseksi 2D-kytkentään ja mitattiin käämivirran yliaallot vastaavissa pisteissä. Lisäksi kaksikäämimoottorille tehtiin lämpenemätesti, jossa moottorin lämpenemä mitattiin taa-juusmuuttajakäyttöisenä nimellisellä kuormituksella.

Säädön parametointi suoritettiin ABB Drivesin henkilökunnan toimesta manuaalisesti, koska molemmille käämeille erikseen suoritettu ID-ajo ei tuottanut oikeita parametreja stabiilisen säädön toteuttamiseksi. Parametrien asettelu oli myös tehtävä uudelleen tilanteessa, jossa moottoria pyöritettiin vain toisella käämillä.

Taulukossa 6 on luetteloituina ja numeroituna käytetyt mittalaitteet ja kuvassa 17 on esitettynä mittauksen periaatteellinen kytkentä. Numeroinnilla on ilmoitettu kyseisen mittalaitteen mittauspiste kytkennässä.

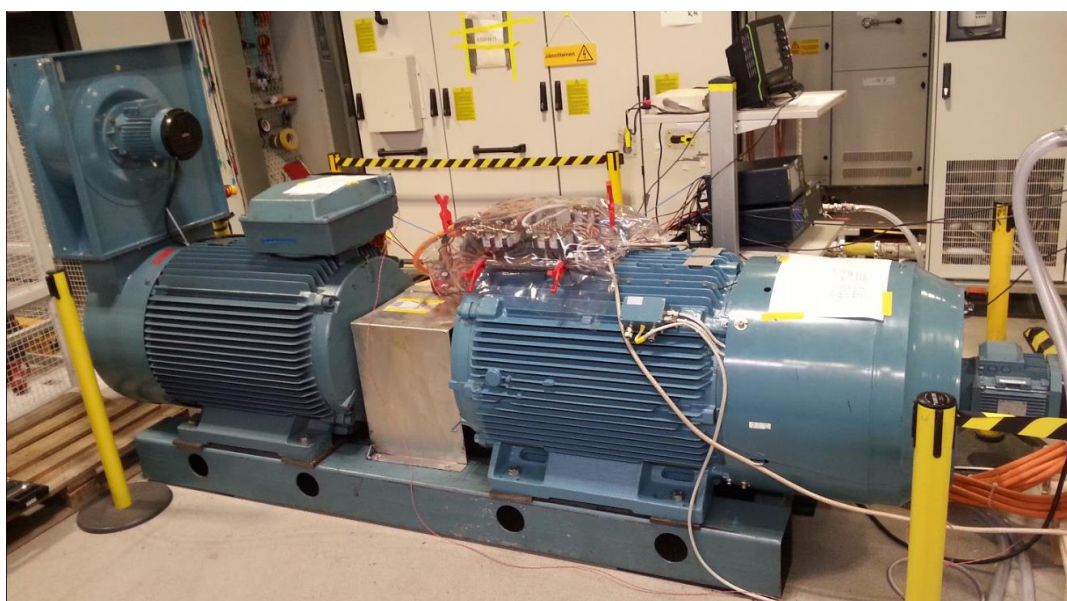
Taulukko 6. Kaksikäämimoottorin mittauksessa käytetyt mittalaitteet.

Käytettyjen mittalaitteiden tyyppi ja ominaisuudet			
Tehoanalysaattori	1	Fluke, Norma 4000	
Tehoanalysaattori	2	Fluke, Norma 5000	
		Näytteenottotaajuus	0,33–1 MHz
		Kaistanleveys	DC–3 MHz, DC–10 MHz
Virtapihti	3	Fluke, Norma 61C1	
Virtapihti	4	Fluke, i1000s AC	
		Virran mittausalue	100mA–1000 A
		Kaistanleveys	5 Hz–100 kHz
Rogowski virta-anturi	5	PEM CWT60B/4/1000	
		Virran mittausalue	300mA–1000 A
		Kaistanleveys	0,1 Hz–16 MHz
Oskilloskooppi	6	HDO6054 LeCroy	
		Näytteenottotaajuus	2,5 GHz
		Kaistanleveys	500 MHz
Jänniteanturi	7	Teledyne LeCroy PP023-2	
Optinen takometri	8	Braun MOVIPORT C118	0–100 kHz
Resistanssimittari	9	Hioki, 3540	
		Resistanssin mittausalue	30 mΩ–30kΩ



Kuva 17. Mittauksissa käytetty periaatteellinen kytkentä. Muokattu lähteestä Heino-
nen 2018: 44

Kuvassa 18 nähdään moottorin testijärjestelyt ABB Drivesin tiloissa Helsingissä.

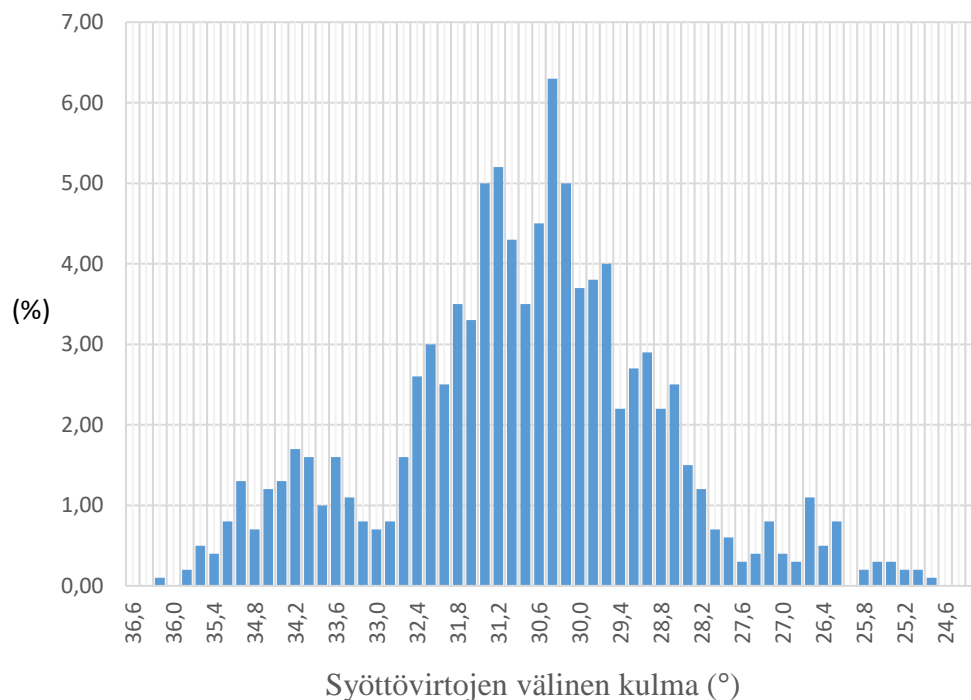


Kuva 18. Kaksikäämisen oikosulkumoottorin testipenkki.

4.1 Käämien välinen syöttövirtojen kulma

Kaksikämmimoottorin käämejä syötettiin omilla inverttereillään. Tässä luvussa tarkastellaan syöttävien virtojen vaihe-eroa 20 s mittausjakson aikana. Käämien välillä on 30 asteen sähköinen vaihe-ero, jolloin myös syöttävät virrat tulisivat olla samassa 30 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Näin ei kuitenkaan todellisuudessa ole, vaan vaihevirtojen välillä on pientä heilahtelua.

Kun säädöt tuottavat yhtä suuren momentin, niin kulma säilyy halutussa 30 asteen vaihesiirrossa. Säädöt eivät ole kuitenkaan tietoisia toisistaan ja toisen taajuusmuuttajan dynaaminen toiminta häiritsee toista säätöä. Säätöä häiritsevät taajuusmuuttajan eriaikaiset puolijohdekytkennät, rajoittimien aktivoituminen ja siirtyminen kentänheikennysalueelle. Häiriötilanteessa vuoestimaatin virhe kasvaa ja virtojen välinen kulma suurenee. Säädön stabiiliudesta riippuu, pysyykö säätö hallinnassa häiriön jälkeen sekä virtojen kulma 30 asteen vaihesiirrossa. (Kostiainen 2018) Kuvasta 19 nähdään oskilloskoopilla mitattu vaihe-erohistogrammi käämivirtojen välillä moottorin nimellispisteessä.

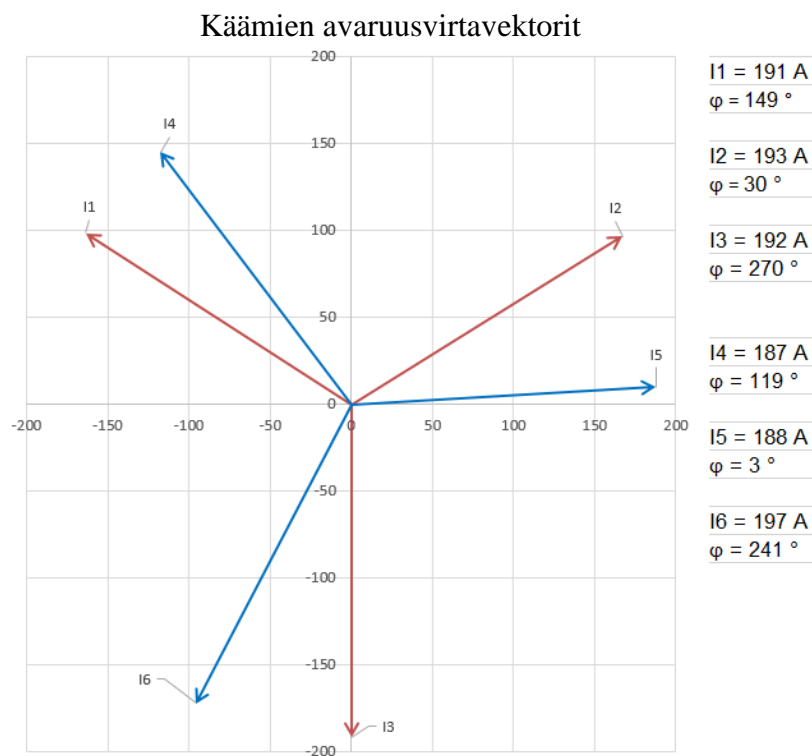


Kuva 19. Kahden käämin vaihevirtojen välisen kulmaeron prosentuaalinen osuus 20 s mittausajasta.

Syöttövirtojen välinen kulma vaihtelee 30 asteen molemmin puolin, mutta pysyy kahden asteen päässä optimaalisesta vaihe-erosta noin 70 % mitatusta ajasta ja noin 24 % mitausajasta ajasta välillä 2–5 astetta. 30 asteen vaihesiirrossa moottorin ilmapäivä on sinuotoisimmillaan ja vaihekulman vaihtelut aiheuttavat vuohon harmonisia yliaaltoja, jotka lisäävät moottorin häviöitä (Khan 2008).

4.2 Virtatasapaino

Kuten kuvien 15 ja 16 laskentatuloksista nähtiin, niin moottorin suorituskyky on parhaimmillaan, kun kummankin käämin virrat ovat keskenään yhtä suuret. Myös kolmivaiheisten käämivirtojen välillä voi esiintyä epätasapainoa, jos käämikierrokset on jaettu usealle haaralle, kuten tässä työssä valmistetussa protomoottorissa. Kiertovirrat ja virtojen epätasaisen jakautumisen aiheuttavat erot haarojen välisessä keskinäisinduktanssissa ja impedansseissa. Kuvassa 20 on esitettyä kaksikämmimoottorin mitatut avaruusvirtavektorit.



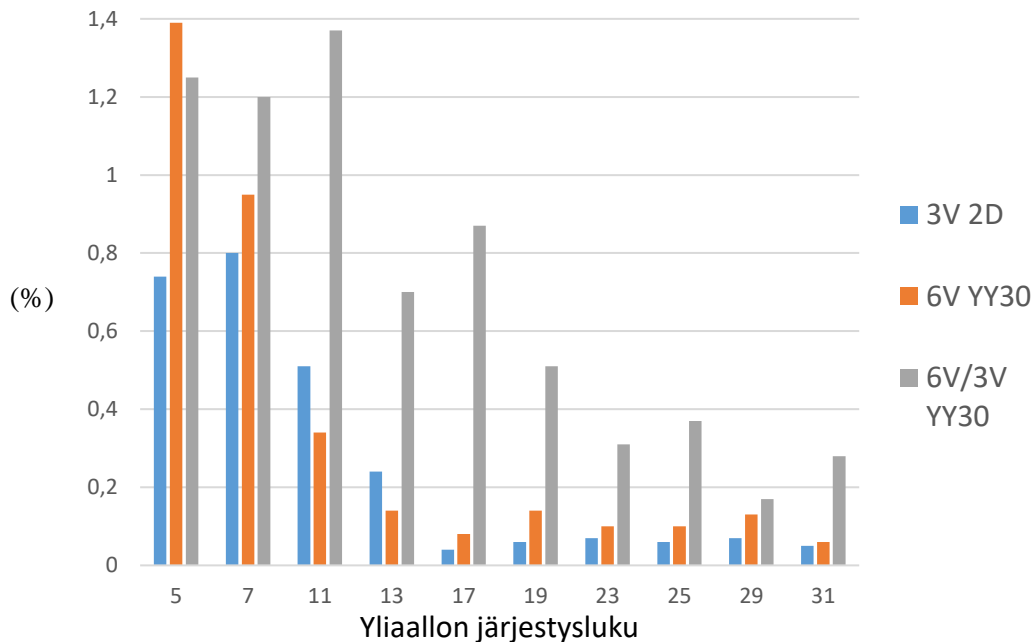
Kuva 20. Kaksikämmisen moottorin mitatut avaruusvirtavektorit.

Kuten kuvasta 20 nähdään, niin ensimmäisen käämin virrat ovat suhteellisen hyvin tasapainossa eikä suuria epäsymmetrioita napapareissa juurikaan esiinny. Toisessa käämissä virtojen erot ovat suuremmat rinnakkaisten haarojen epäsymmetriasta johtuen. Virrat I4 ja I5 ovat kyseisessä kuormituspisteessä nimellistä arvoa pienemmät ja virta I6 on nimellistä arvoa suurempi. Virtojen epäsymmetria on ongelmallista, koska se suurentaa moottorin lämpenemää ja vääntömomentin rippeliä. Kummankin käämin virran keskiarvot ovat kuitenkin keskenään lähes yhtä suuret ja molemmat käämit osallistuvat momentin tuottoon tasaisesti.

Rinnakkaisten haarojen käyttö käämityksen rakenteessa ei siis ole suositeltavaa, koska kaksikääinen moottori on erityisen herkkä syötöstä aiheutuville staattorikäämien kiertovirroille ja rinnakkaiset haarat ja niiden väliset epäsymmetriat voivat lisätä kiertovirtojen aiheuttamia häviöitä entisestään.

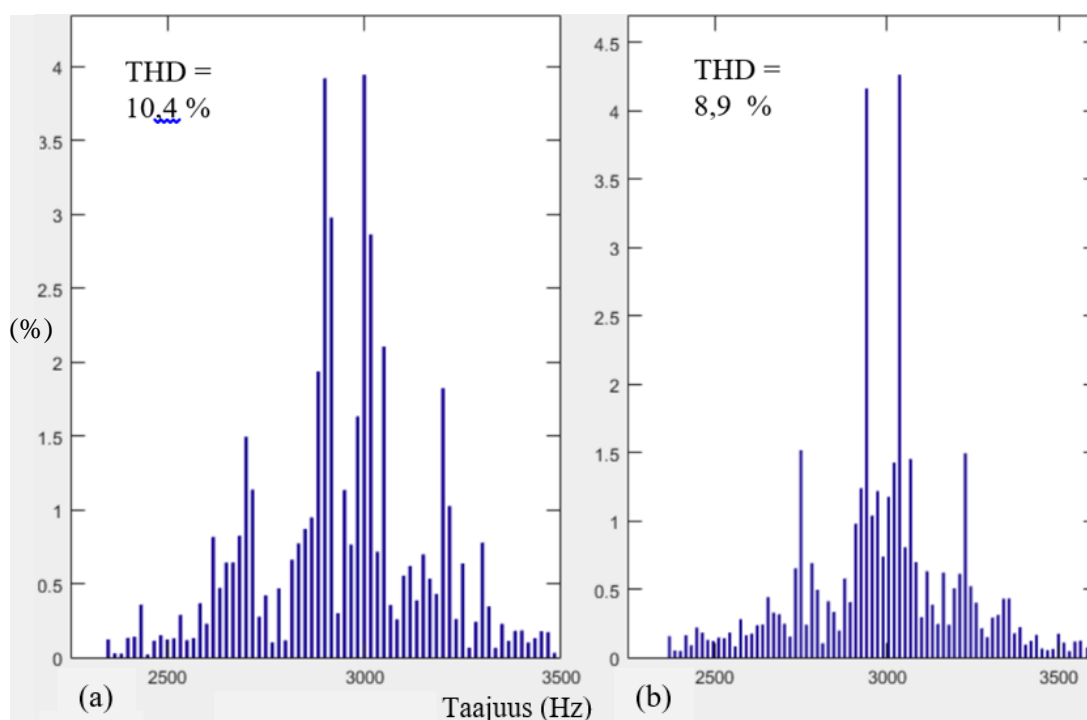
4.3 Käämivirran yliaallot

Käämivirran yliaallot mitattiin kuusi- ja kolmivaiheisena YY30-kytkennässä, kolmivaiheisena 2D-kytkennässä. 2D-kytkennän kytkentätaajuisia yliaaltoja ei voida suoraan verrata kuitenkaan YY30 kytkentöihin, koska 2D kytkennässä käytetty taajuusmuuttajan kytkentätaajuus oli 1,5 kertainen YY30-kytkennöissä käytettyyn 3 kHz nähden. Korkeampi kytkentätaajuus tuottaa sinimuotoisempaa virtaa, jolloin myös käämivirran kokonaissärö on alhaisempi. Toisaalta kun kytkentätaajuus on riittävän suuri, ei sillä ole juurikaan vaikutusta matalien virtayliaaltojen suuruuteen. Kuvassa 21 on esitetty parittomien ($k = 6n \pm 1$, missä $n = 1, 2, 3$ jne.) yliaaltojen amplitudi suhteutettuna käämivirran perusaaltoon.



Kuva 21. Mitattujen parittomien virtayliaaltojen prosentuaalinen osuus käämivirran perusaallon amplitudista kolmivaiheisessa kytkennässä 2D ja kytkennässä YY30. YY30 kytkennässä moottoria testattiin kuusivaiheisena sekä kolmivaiheisena vain toisella käämillä kytkennässä 6V/3V YY30.

Kuusivaiheisessa kytkennässä 5. ja 7. yliaalto ovat korkeampia kuin kolmivaiheisessa kytkennässä, johtuen puolittuneesta vakoluvusta. 6V/3V YY30-kytkennässä, jossa kak-sikäämimoottoria syötetään vain toisella taajuusmuuttajalla, esiintyy eniten matalataajuisia yliaaltokomponentteja, kun puolet urista on virrattomia toisen käämin ollessa käyttä-mättömänä ja tällöin ilmavälivuon sinimuotoisuus vähenee ja matalia yliaaltoja syntyy enemmän. Kuvassa 22 nähdään mitatut kytkentätaajuiset yliaallot YY30-kytkennässä yh-dellä ja kahdella taajuusmuuttajalla syötettynä suhteessa virran perusaallon amplitudiin, sekä virtojen kokonaissäröjen arvot kummassakin tapauksessa.



Kuva 22. Mitattujen kytkentätaajuuksien virtayliaaltojen prosentuaaliset osuudet käämi-virran perusaallon amplitudista kuusivaiheisessa kytkennässä YY30 (a) ja kolmivaiheisessa kytkennässä 6V/3V YY30 (b).

Kaksikämmimoottorin kahden taajuusmuuttajan syötöllä esiintyy enemmän kytkentätaajuisia yliaaltoja kuin yhden taajuusmuuttajan syötöllä. Tämän vuoksi tuplasyötöllä virran kokonaissärö on 1,7 % korkeampi verrattuna syöttöön yhdellä taajuusmuuttajalla. Toisaalta korkeimpien piikkien amplitudit eivät kasva tuplasyötön vaikutuksista.

Matalien yliaaltojen suuruudet ovat kaikissa kytkennöissä suhteellisen pieniä verrattuna perusaallon amplitudiin ja niiden suuruudet vastaavat laskettuja tuloksia. Tästä voidaan päätellä, että kahden taajuusmuuttajan syötöllä ei ole juurikaan vaikutusta matalan kertaluvun ($k = 6n \pm 1$, missä $n = 1, 2, 3$ jne.) yliaaltojen suuruuteen, vaan ne johtuvat moottorin rakenteesta.

4.4 Kaksikämmisen oikosulkumoottorin lämpenemäko

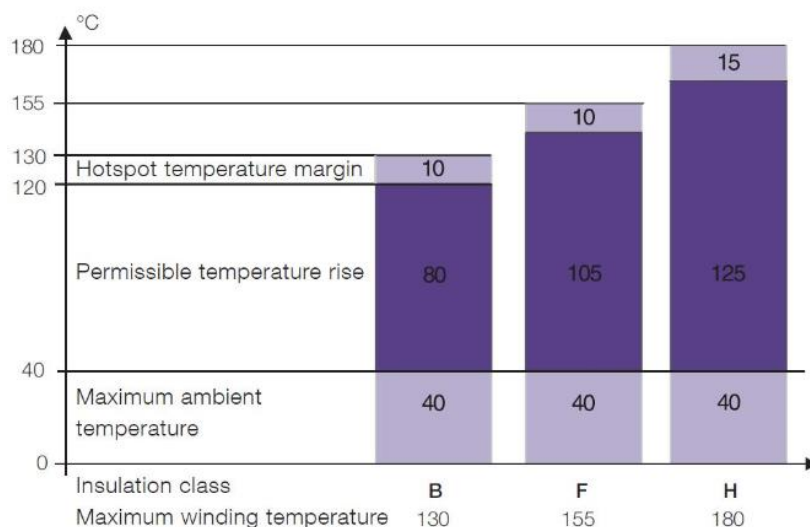
Lämpenemäkokeessa moottoria kuormitetaan halutulla kuormituksella niin kauan, että moottorin lämpötila ei muutu yhden tunnin aikana kahta astetta enempää. Tämän jälkeen

moottorin syöttövirta katkaistaan ja moottori pysäytetään nopeasti. Kahden vaiheen välinen resistanssi mitataan kylmästä moottorista ja heti testin jälkeen lämpimästä moottorista eri ajanhetkillä. Tästä syntyy moottorin jäähtymäkäyrä, jonka avulla moottorin lämpenemä saadaan selville. Kylmän käämiresistanssin mittaukselle saadaan referenssipiste samalla hetkellä mitatusta ympäristön lämpötilasta. Moottorin lämpenemä $\theta_2 - \theta_a$ laskeaan yhtälöstä

$$\theta_2 - \theta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \theta_1) + \theta_1 - \theta_a, \quad (16)$$

missä θ_1 on kylmän käämin resistanssimittauksen referenssilämpötila ($^{\circ}\text{C}$), θ_2 on käämin lämpötila ($^{\circ}\text{C}$) lämpenemätestin lopussa ja θ_a on jäähdykkeen lämpötila ($^{\circ}\text{C}$) lämpenemätestin lopussa. R_1 on kylmän käämin resistanssi lämpötilassa θ_1 , R_2 on käämin resistanssi lämpötilassa θ_2 . (IEC 2017: 41)

Moottorin suurimpaan sallittuun lämpenemään vaikuttaa moottorissa käytetyt eristeaineet. Kuvassa 23 on esitetty yleisimmät eristysluokat (B, F ja H). Kaksikäämisessä oikosulkumoottorissa käytettiin F-luokan eristystä. Käytettäessä mitattua käämin resistanssia lämpenemän laskemiseksi maksimilämpenemät eristysluokille ovat 80, 105 ja 125 K. Vastaavat rajat käämityksessä kiinni olevaa anturia käytettäessä ovat 90, 115 ja 140 K. (IEC 2017: 46)



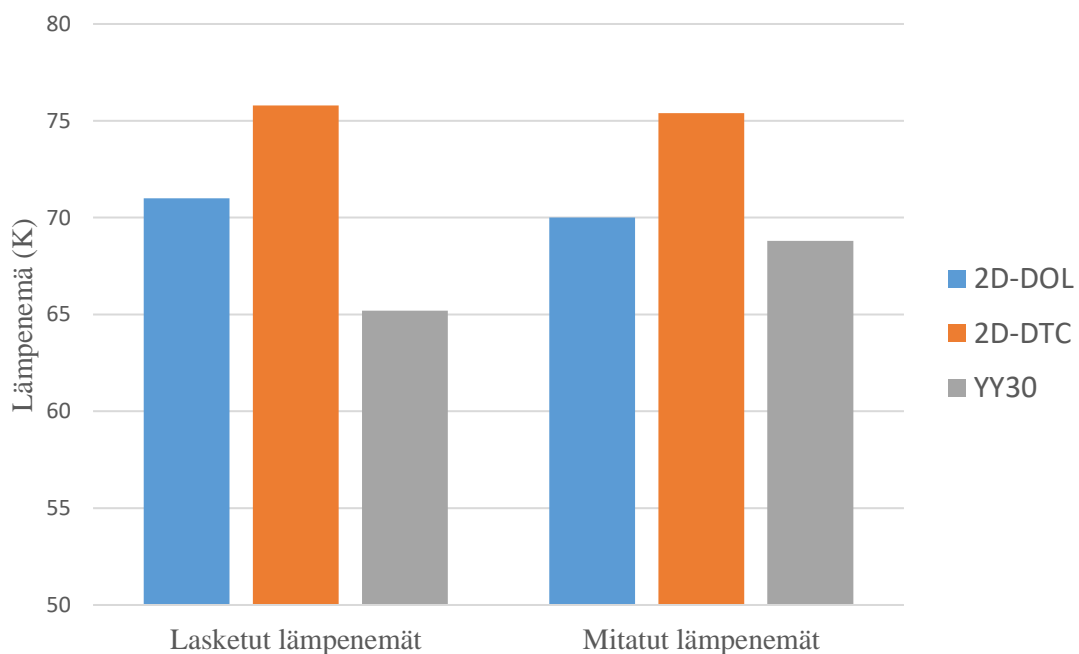
Kuva 23. IEC 60034-1 -standardissa määritetyt eristeaineiden lämpötilaluokat (Kinnunen 2014).

Lämpenemäkokeessa selvitettiin moottorin lämpenemä nimellispisteessä YY30-kytkennässä taajuusmuuttajakäyttöisenä ja 2D-kytkennässä suoraan verkosta ja taajuusmuuttajalla syötettynä. Moottorin jäähdytykseen käytettiin molemmissa kytkennöissä samaa erillispuhallinta. Taulukosta 5 nähdään, että moottorin kuormitettavuus taajuusmuuttajakäyttöisenä on noin 90 % sinimuotoiseen syöttöön verrattuna, kun lämpenemä pidetään samalla tasolla. Taulukossa 7 on listattuna moottorin mittaustulokset kytkennöissä 2D, YY30 ja YY30 6V/3V.

Taulukko 7. Kaksikämmisen oikosulkumoottorin mittaustulokset eri kytkennöissä.

Mitattu suure	2D-DOL	YY30 1/2	YY30 2/2	6V/3V YY30
Taajuus (Hz)	50,1	50,4	50,4	46,6
Jännite (V)	600	472	471	472
Virta (A)	362	193,3	191,9	216
Tehokerroin ($\cos \varphi$)	0,87	0,77	0,78	0,7
Pyörimisnopeus (rpm)	1491	1499,4	1499,4	1400
Momentti (Nm)	2020	901	905	960
		Σ 1806		
Mekaaninen teho (kW)	315	141,5	142	141,6
		Σ 283,6		
Virran THD (%)	-	11,7	10,2	8,88
Lämpenemä $\theta_{pt 100}$ (K)	82,6	81,2	78	65,8
Lämpenemä θ_{Cu_120} (K)	70	68,8		-

Summamerkeillä Σ ilmoitetaan taulukossa 7 kaksikäämimoottorin kummankin käämin tuottama yhteenlaskettu momentti ja mekaaninen teho. 6V/3V YY30-kytkennässä moottorin pyörimisnopeus on hieman alhaisempi nimellispisteessä esiintyneen testipenkin mekaanisen resonanssitaajuuden vuoksi, kun käytettiin käämiä 2. Tässä kytkennässä käämi-resistanssin mittausta lämpenemän laskemista varten epäonnistui, mutta Pt 100 lämpötilantureiden lämpötilasta voidaan kuitenkin arvioida moottorin lämpenemää verrattuna muihin mittauksiin. Kaksikäämisen oikosulkumoottorin lämpenemätestin tuloksille ei löytynyt suoraan sopivaa vertailukohtaa, joten mitattuja arvoja on verrattava laskettuun lämpenemään. Laskelman tarkkuus on pyritty varmistamaan vertaamalla 2D-kytkennän lämpöajoja ja laskettua arvoa keskenään. 2D-kytkentä sopii vertailukohdaksi, koska moottorin rakenne ja jäähdytys ovat samat YY30-kytkentään verrattuna. Kuvassa 24 on esitetty mitattu ja laskettu lämpenemä eri kytkennöissä. Lasketut arvot eivät vastaa täysin todellisia arvoja, mutta niistä voidaan kuitenkin tehdä päätelmiä kaksikäämikoneen lämpenemään liittyen.



Kuva 24. Mitatut ja lasketut moottorin lämpenemät kytkennöissä 2D ja YY30.

2D-kytkennässä lämpenemän tulisi olla yhtä suuri DOL- ja DTC-syötöllä, mutta se on suurempi DTC-syötöllä, koska tässä kytkennässä taajuusmuuttajan nimellisjännite on moottorin nimellisjännitettä pienempi. Vertailtaessa mitattuja ja laskettuja lämpenemän arvoja huomataan, että 2D-kytkennässä lämpenemät vastaavat laskettuja arvoja kohtuullisen tarkasti, mutta YY30 kytkennässä laskettujen ja mitattujen arvojen välillä on huomattava ero. Mitattu lämpenemä kasvaa noin siis lähes 5 K verrattuna lämpenemään laskelman mukaan, jossa ei esiinny korkeita kytkentätaajuisia yliaaltoja. Kasvanut lämpenemä on selitettävissä invertterien keskinäisistä häiriöistä ja käämin 2 rakenteellisesta epäsymmetriasta johtuvilla korkeataajuisilla kiertovirroilla sekä käämin 2 virtojen epäsymmetrialla. Fcsmek-ohjelmalla laskettujen tulosten perusteella korkeataajuisien yliaaltojen ja rinnakkaisten haarojen epäsymmetriasta aiheutuva lämpenemä pienentää kuormitettavuutta karkeasti arvioituna noin 1 % kahdella taajuusmuuttajalla syötettynä, mikäli lämpenemä pidetään samalla tasolla kuin yhden taajuusmuuttajakäytön kuormituksessa, joka on noin 90 % nimellistehosta sinimuotoisella jännitteellä.

Kaksikäänmoottorin pitäisi pystyä tuottamaan vähintään 50 %: n teho pelkästään yhdellä käämillä toisen taajuusmuuttajan vikaantuessa. 6V/3V YY30-kytkennässä moottorin pyörimisnopeus nimellistä nopeutta pienempi ja kuorma suurempi kuin puolet nimellisestä kuormasta, jolloin myös moottoria lämmittävä virta on kyseisellä teholla nimellistä arvoa suurempi. Verrattaessa Pt 100-antureiden tuloksia nähdään, että kytkennässä 6V/3V YY30 moottoria voidaan kuormittaa helposti puolella teholla ja suurempikin kuormitus on mahdollista moottorin lämpenemän rajoissa.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tekeminen on ollut kohtalaisen pitkäkestoinen projekti, johon on kokonaisuutena liittynyt monia eri työvaiheita ja käytännön järjestelyjä. Projektin aikana pääsin seuraamaan lähietäisyydeltä, kuinka sähkömoottorin valmistusprosessi etenee tuotannossa alusta loppuun ja kuinka suuren yrityksen eri yksiköt toimivat yhdessä yhteisen päämäärän saavuttamiseksi. Diplomityö on sisältänyt pääpiirteissään seuraavat tehtävät:

- käämiasetteluiden mallinnus ja simulointi
- kaksikäämisen staattorin suunnittelu tuotantomootorin staattoripakettiin
- protomootorin konstruktion käytäntöön pano ja toteutus
- mittausjärjestelyiden aikataulutus ja käytännön toteutus
- mittausdatan käsittely
- moottorin kuormitettavuuden ja käämivirran yliaaltosisällön selvittäminen mitausdatan avulla
- säädön toimivuuden todistaminen käytännössä mittaustuloksiin perustuen.

Fcsmek-ohjelmalla mallinnettiin kaksikäämimoottorin toimintaa taajuusmuuttajakäyttöisenä erilaisilla käämien asetteluilla ja pyrittiin löytämään käämin rakenne, joka on mahdollisimman redundantti ja joka tuottaa mahdollisimman vähän harmonisia yliaaltoja käämivirtaan ja ilmajälivuohon. Laskentatuloksilla vahvistettiin jo aiemmissa tutkimuksissa saatu tulos, että kaksikäämimoottorissa testatuista kytkennöistä YY30-kytkentä täyttää edellä mainitut ominaisuudet parhaiten. Laskentatulosten perusteella kaksikäämimoottorin häviöt ja virran ja momentin kokonaissärö eivät ole suuremmat vastaavaan kolmivaiheiseen moottoriin verrattuna, kun taajuusmuuttajien kytkennät eivät häiritse toisiaan.

Mittauksilla selvitettiin kahden taajuusmuuttajan aiheuttamien yliaaltojen suuruutta ja niiden aiheuttamaa ylimääräistä moottorin lämpenemää. Kaksikäämimoottorista mitatut

5. ja 7. yliaalto olivat hieman suuremmat yhdellä taajuusmuuttajalla syötettyyn kolmivaihemoottoriin verrattuna, mutta ne vastaavat laskettuja arvoja ja johtuvat moottorin rakenteesta, joten tuplasyöttö ei lisää moottorin käämivirran matalataajuisia yliaaltoja.

Vertailtaessa mitattuja kytkentätaajuisia yliaaltoja YY30-kytkennässä yhden ja kahden taajuusmuuttajan syötöllä huomataan, että kytkentätaajuisien yliaaltojen määrä kasvaa hieman kahdella taajuusmuuttajalla syötettynä, mikä johtuu taajuusmuuttajien välisistä häiriöistä virran estimoinnista huolimatta. Myös staattorikäänityksessä käytetyt rinnakkaiset haarat lisäävät myös kiertovirtojen määrää napapareissa esiintyvien rakenteellisten epäsymmetrioiden vuoksi ja parempi suorituskky olisi mahdollisesti saavutettu suunnitelmalla käänitys, jossa napaparien käänikierrokset on kytketty sarjaan. Näiden yliaaltojen ja napaparien epäsymmetrian aiheuttamaa ylimääräistä lämpenemää arvioitiin kaksikäänimoottorin lämpenemälaskelman avulla, jonka tarkkuus varmistettiin vertaamalla mitattujen lämpenemätestien ja laskettujen arvojen välillä 2D-kytkennässä. Tulosten perusteella lämpenemä kasvaa hieman kahden taajuusmuuttajan syötöllä, mutta lämpenemä ei ylitä eristysluokan B lämpenemärajaa, joka on 80 K. Moottoria voidaan myös huoletta kuormittaa ainakin puolella teholla ja yhdellä käänillä, siis toisen taajuusmuuttajan voituessa.

Kaksikäänimisen oikosulkumoottorin rakenteesta aiheutuvat matalataajuiset yliaaltokomponentit ovat suhteellisen pieniä korkeilla kytkentätaajuuksilla, joten se on sopiva moottorityyppi erillissäätöohjaukseen kolmivaihesyötön kerrannaisina. Käytettäessä erillissäätöä moottorin lämpenemä on hieman suurempi verrattaessa laskettuihin arvoihin, jossa korkeataajuisia kiertovirtoja ei esiinny, mutta ero on suhteellisen pieni ja osittain ylimääräinen lämpenemä selittyy käänin 2 virtojen epäsymmetriasta aiheutuvilla kiertovirroilla ja käänivirran kasvulla. Tarkalla moottorin suunnittelulla ja säädön optimoinnilla korkeataajuiset kiertovirrat voidaan minimoida. Tässä työssä saatujen tulosten perusteella erillissäätö virtaestimaatilla vaikuttaa olevan toimiva ja yksinkertainen ratkaisu kaksikäänimisen oikosulkumoottorin ohjaukseen, mikäli säätö on riittävän stabiili eri kuormituksilla ja kierrosnopeuksilla.

LÄHTEET

- Arkkio, A. (1987). *Analysis of induction motors based on the numerical solution of the magnetic field and circuit equations*. Helsingin Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikka. Väitöskirja. 97 s.
- Alberti, L. & N. Bianchi (2011). Experimental Tests of Dual Three-Phase Induction Motor Under Faulty Operating Condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59: 5, 2041–2048.
- Bojoi, R., F. Farina, M. Lazzari, F. Profumo & A. Tenconi (2003). Analysis of the asymmetrical operation of dual three-phase induction machines. *IEEE International Conference In Electric Machines and Drives, 2003 IEMDC'03*. Madison, WI, USA, USA, 1-4 June 429–435.
- Burzanowska, H., P. Sario, C. H. Stulz & P. Joerg (2007) Redundant Drive with Direct Torque Control (DTC) and dual-star synchronous machine, simulations and verification. *European Conference on Power Electronics and Applications*. Aalborg, Denmark, 2–5 Sept. 1–10.
- Heinonen, M. (2018) *Kaksikäämikone redundanttisessa taajuusmuuttajakäytössä*. Aalto-yliopisto. Automation and electrical Engineering. Diplomityö. 63 s.
- Hsieh, M. F., Y. C. Hsu, D. G. Dorrell & K. H. Hu (2007) Investigation on End Winding Inductance in Motor Stator Windings. *IEEE Transactions on Magnetics* 43: 6, 2513–2515.
- International Electrotechnical Commission (2017). IEC 60034-1 Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance. 148 s.
- International guidelines for the safe operation of dynamically positioned offshore supply vessels* (2015). London: IMC A. [online]. [27.6.2018]. Saatavissa: <https://www.imca->

int.com/publications/236/international-guidelines-for-the-safe-operation-of-dynamically-positioned-offshore-supply-vessels/

Kallio, S. (2014). *Modeling and parameter estimation of double-star permanent magnet synchronous machines*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikka. Väitöskirja. 68 s.

Kanerva, S. & J. F. Hansen (2009). State of the art in electric propulsion: viewpoint on redundancy. 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Baltimore, MD, USA, 20–22 April. 499–504.

Kanerva, S., O. Toivanen, P. Sario & W. Arshad (2008) Experimental study on harmonic losses of a dual-stator synchronous motor with redundant voltage source inverter drive. *International Conference on Electrical Machines*. Vilamoura, Portugal, 6–9 Sept. 1–4.

Karttunen, J. (2017). *Current harmonic compensation in dual three-phase permanent magnet synchronous machines*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikka. Väitöskirja. 80 s.

Karttunen, J., S. Kallio, P. Peltoniemi, P. Silventoinen & O. Pyrhönen (2012). Dual three-phase synchronous permanent magnet machine supplied by two independent voltage source inverters. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. Sorrento, Italy 20–22 June 741–747.

Khan, S. K. (2008). *Comparative analysis of multiphase machines*. Chalmersin teknillinen yliopisto. Sähkötekniikka. Diplomityö. 52 s.

Kinnunen, J. (2014). *ABB oy kotimaan myynti, ABB:n pienjännitemoottorit*. [online]. [26.1.2019]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/19154823-Jarno-kinnunen-abb-oy-kotimaan-myynti-2014-abb-n-pienjannitemoottorit.html>

- Kostiainen, M (2018). *Independently controlled double winding motor — Parameter transformations for induction motor*. ABB oy, Helsinki. Sisäinen raportti. 15 s.
- Kostiainen, Mikko (2018). Kaksikääkikoneen syöttö. Sähköpostiviesti Jaakko Kropsulle 11.12.2018.
- Krause, P., O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff & S. Pekarek (2013) *Analysis of electric machinery and drive systems*. 75. painos. New York, John Wiley & Sons. 680 s.
- Levi, E., R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat & S. Williamson (2007). Multiphase induction motor drives - a technology status review. *IET Electric Power Applications*. 1: 3, 489–516.
- Liwschitz-Garik M. & C. C. Whipple (1950). *Electric Machinery Vol. II: AC Machines*. 5. painos. USA. D. Van Nostrand Company, Inc. 576 s.
- Madinabeitia, I. G. D. (2016). *Analysis of force and torque harmonic spectrum in an induction machine for automotive NVH purposes*. Chalmersin teknillinen yliopisto. Sähkö- ja energiatekniikka. Diplomityö. 78 s.
- Pyrhönen, J. (1991). Calculating the effects of solid-rotor material on high-speed induction motor characteristics. *European Transactions on Electrical Power*. [Online]. 1: 6 [22.6.2018], 301–310. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/229704340_Calculating_the_effects_of_solid-rotor_material_on_high-speed_induction_motor_characteristics
- Pyrhönen, J., T. Jokinen & V. Hrabovcova (2014). *Design of Rotating Electrical Machines, 2nd Edition*. John Wiley & Sons. 612 s.
- Ranta, M. (2013). *Dynamic induction machine models including magnetic saturation and iron losses*. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikka. Väitöskirja. 138 s.

- Reusser, C. A. & H. Young (2016). Nine-switch converter application on electric ship propulsion: A redundancy approach. *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. Toulouse, France, 2–4 Nov. 1–7.
- Singh, G. K., K. Nam & S. K. Lim (2005). A Simple Indirect Field-Oriented Control Scheme for Multiphase Induction Machine. *IEEE transactions on industrial electronics* 52: 4, 1177–1184.
- Vesala, J. (2010). *Suurnopeusmoottorin kolmiulotteinen sähkömagneettinen mallintaminen*. [Online]. [23.6.2018]. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikka. Diplomityö. 88 s. Saatavissa: http://www.tut.fi/eee/opetus/pdf%20julkiset%20dtyot/Vesala_Jaakko_julk.pdf
- Westerlund, J. (2015). *YY0 mutual inductance of induction generator*. ABB oy, Helsinki. Sisäinen raportti. 9 s.
- Westerlund, J. (2015). *YY30 mutual inductance of induction generator*. ABB oy, Helsinki. Sisäinen raportti. 7 s.
- Zhao, Y. & T. A. Lipo (1995). Spacevector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition. *IEEE Transactions on industry applications* 31: 5, 1100–1109.

LIITTEET

Liite 1. Kaksikäämimoottorin lämpenemäkoekytkenässä 2D-DOL.

Test Place TP5 MoLab 8.0 Build 0 Printed: 28/08/2018 PAGE R 1

ABB Motors		3-Phase Induction Motor		Work Nr. 3200381-1	
Testing Record Sheet		Nr. 3G1P174900522	Ver: D	Calculation Nr. 3GZF021035-423	
Type M3BP 355SMB 4 B3					
Power 315.0 kW	Duty	Supply cables		Ambient 40	
Voltage 600 V	Speed 1491 rpm	Connection D	Shaft Material		
Current 366.0 A	Frequency 50.00 Hz	P 55	Insulation Class F Temperature Class B		
cos ϕ 0.86	Project	Direction	Bearings D 6322/C3 N 6316/C3		
Test (146) Type test with report for motor from specific delivery batch				Approved by:	
Remarks 2D DOL		Stamping			
Rotor Length, slots, sign, skewness 0 0 0.0 mm		Stator Length, slots 0 mm 0		Insulation Resistance	
		Axial clearance 0.00 mm		°C MΩ V MΩ V	
Fan: 0 Ø 350 mm		High Voltage Test		Overload Test	
Shaft Voltage 0.00 mV		St. V; 0 sec		T= °C n; 0 sec	
MAX MIN		V; 0 sec		Overvoltage Test	
Stator Diameter, mm		V; 0 sec		U= °C U _n ; 0 sec	
D 0.00 0.00		Locked Rotor Test		Overspeed Test	
M 0.00 0.00		Measured by RoHs Date 28/08/2018		n= °C n _s ; 0 sec	
N 0.00 0.00		ΣU _k /3, V I _k /I _N ΣI _k /3, A P _k , W I _k ', A I _k '/I _k cos ϕ _k f _k , Hz		Overcurrent Test	
Rotor Diameter, mm		150.6 1.5 548.2 42729 2184 1.0491 0.2989 50.007		I= °C I _n ; 0 sec	
D 0.00 0.00		105.4 1.0 365.7 19077 2082 1.0000 0.2857 50.025			
M 0.00 0.00		87.1 0.8 293.1 12260 2019 0.9699 0.2774 50.018			
N 0.00 0.00		59.0 0.5 182.9 4804 1861 0.8937 0.2571 50.017			
Air-Gap δ = 0.000 - 0.000 mm					
No-Load Curve		Locked Rotor Curve			
No-Load Test R _{UV} = 12.84 mΩ		Measured by RoHs Date 28/08/2018			
Notes RES= roottorin lämpötila					
ΣU/3, V	ΣI ₀ /3, A	P ₀ , W	U/U _N	I ₀ /I _N	P ₀ -P _{Cu} P _{0N}
719.7	181.28	7316	1.199	1.692	1.530 50.011
660.0	133.71	5402	1.100	1.248	1.158 50.015
600.1	107.12	4368	1.000	1.000	0.949 50.011
540.1	91.03	3681	0.900	0.850	0.806 50.013
480.1	79.02	3134	0.800	0.738	0.690 50.014
360.1	57.94	2269	0.600	0.541	0.505 50.013
240.0	38.39	1612	0.400	0.358	0.362 50.016
180.1	29.33	1342	0.300	0.274	0.303 50.010
120.0	21.29	1117	0.200	0.199	0.254 50.012
90.0	17.19	1017	0.150	0.160	0.231 50.010
P, W	P _{Fe} , W	P _{Cu} , W	t, s	s, rpm	n ₀ , rpm
1017	3130	220.9	120	0.5	1499.8


PRINTED FROM F:\M\999007

2D-DOL
Geo V


	U' Δ H ₀₁	U Δ rms
① Hes	437,8	518 V
1' H ₀₁	205,8	205,12

Type	M3BP 355SMB 4 B3	Testing Record No.	3G1P174900622	Ver. ID	
Partial Loads					
Load Motors	JG5	Generator	G5	Measured by RoHo	
Torque Transducer	10 kNm	Meters	TP5	MOTOR TEST	

[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]

ABB Motors			3-Phase Induction Motor			Calculations		
Calculated Values			Nr.	3G1P174900522	Ver: D			
Type	M3BP 355SMB 4 B3					Work Nr.	3200381-1	
Power	315.0 kW	Duty			Speed	1490.7 rpm	Calculation Nr.	3GZF021035-423
Voltage	600 V	Connection D			Torque	2017.9 Nm	Ambient 40	
Current	361.99 A	Frequency	50.0 Hz	Direction	 IP	55	Insul. Class	F Temp. Class B
Approved by:			Tested as Motor			Rotor Bar Material Al		
Motor Parameters			No-Load Test			Efficiency		
I_0	107.1 A		$\frac{U}{U_N}$	$\frac{I_0}{I_{0N}}$	$\frac{P_0 - PC_u}{P_{0N}}$		^{1,0} IEC Tested	^{1,0} IEC Calculated
$\cos \varphi_0$	0.0392		1,2	1.692	1.530	U_1	600.5 V	600.5 V
P_0	4368 W		1,1	1.248	1.158	I_1	361.99 A	361.99 A
Z_0	3.234 Ω		1,0	1.000	0.949	I_2	0.0 A	0.0 A
n_0	1499.8 rpm		0,9	0.850	0.806	P_{fw}	1001.3 W	1001.2 W
I_k	2082 A		0,8	0.738	0.690	P_{Fe}	3090.3 W	3090.3 W
$\cos \varphi_k$	0.2857		0,6	0.541	0.505	P_s	2751.6 W	2770.7 W
Z_k	0.1664 Ω		0,4	0.358	0.362	P_r	2035.2 W	2049.7 W
R_k	0.0475 Ω		0,3	0.274	0.303	P_L	2406.4 W	2400.6 W
X_k	0.1594 Ω		0,2	0.199	0.254	P_T	11284.8 W	11312.5 W
P_k	19077 W		0,15	0.160	0.231	P_{out}	314.81 kW	314.82 kW
R_{1v} (20°C)	5.37 m Ω					P_{in}	326.09 kW	326.13 kW
R_{2v} (20°C)	0.00 m Ω					η	96.5 %	96.5 %
						$\cos \varphi$	0.866	0.866
	Δ	Y				s	0.64 %	0.64 %
T_N	2018 Nm		2018 Nm		2018 Nm	n	1490.8 rpm	1490.7 rpm
T_L/T_N	0.00		0.00		0.00	Temperature Rises		
T_U/T_N	0.00		0.00		0.00	$\Delta \Theta_{Cu10}$	73.1 K	73.1 K
T_B/T_N	0.00		0.00		0.00	$\Delta \Theta_{Cu1}$	¹²⁰ 69.9 K	69.9 K
I_A	2342.6 A		0.0 A		A	$\Delta \Theta_{DW}$	88.1 K	0.0 K
I_W/I_N	6.40		0.00			$\Delta \Theta_{Cu2}$	0.0 K	0.0 K
I_W/I_k	1.13		0.00			$\Delta \Theta_R$	0.0 K	0.0 K
Short-Circuit Test						$\Delta \Theta_F$	26.8 K	0.0 K
I/I_N	1.50	1.00	0.80	0.50	0.00	$\Delta \Theta_{NB}$	53.9 K	0.0 K
I_k'/I_k	1.0491	1.0000	0.9699	0.8937	0.0000	U_{amb}	22.7 °C	0.0 °C

[illegible][illegible]

Test Place		TP5		MotLab 8.0 Build 0		PAGE R 7		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">ABB Motors</div>				Nr. 3G1P174900522E				Work Nr. 3200381-1 Calculation Nr. 3GZF021035-423 3G1P174900522
Type M3BP 355SMB 4 B3								
Power	315.000	kW	Duty					
Voltage	400	V	Speed	1491	rpm	Connection	D	
Current	550.000	A	Frequency	50.00	Hz	IP	55	
cos φ	0.86		Project			Direction		
				Stamping Insulation Class F Temperature Class B Bearings D 6322/C3 N 6316/C3				
Factory & Customer notes								
Factory notes: Hes1 UHo1 437.8V IH01 205.8 Urms 518V 205A Hes2 UH01 437.21, IH01 203A Urms 519.06V 203.9A Jännitteet 518.2V, 519.4V, 519.6V Virta 197.5A, 205.8A, 208.6A								
Customer notes:								

Liite 3. Kaksikäämimoottorin lämpenemäkoee kytkennässä 2D-DTC.

Type	M3BP 355SMB 4 B3	Motor Nr.	3G1P174900522	Ver.	G	Test Place	TPS	Model	00000000	Printed	04/09/2018	KTX5	PAGE	R 2																			
Cold Resistance	Resistance UW/After Temperature Test	Cooling Curve	Date	04/09/2018	Measured by	RoH	Temperature Channels 9 to 16																										
U= 25.0 °C	t, s	R, mΩ																															
	0	14.286																															
	60	14.207																															
	75	14.188																															
UW	11.002	90	14.169																														
UV	10.949	120	14.134																														
VW	11.011	150	14.100																														
	180	14.067																															
	0	0.000																															
	0	0.000																															
Temperature Test	Date	04/09/2018	Measured by	Maek	Temperature Channels 17 to 24																												
Load	283 kW	Generator	G5																														
Load Motors	JG5	Meters	TP5																														
Torque Tr.	MOTOR TEST																																
f Hz	U1 V	U2 V	U3 V	U4 V	U5 V	U6 V	U7 V	U8 V	U9 V	U10 V	U11 V	U12 V	U13 V	U14 V																			
0.01	50.3	501.9	502.0	502.1	502.0	502.5	502.4	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.02	50.4	502.0	502.2	502.3	502.1	502.2	502.3	502.6	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.03	50.4	502.0	502.2	502.2	502.3	502.1	502.2	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.04	50.4	502.0	502.2	502.2	502.3	502.1	502.2	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.05	50.4	502.1	502.3	502.2	502.3	502.1	502.2	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.06	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.07	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.08	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.09	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.10	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.11	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.12	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.13	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.14	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.15	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.16	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.17	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.18	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.19	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.20	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.21	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.22	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.23	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.24	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.25	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.26	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.27	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.28	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.29	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.30	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.31	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.32	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.33	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.34	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.35	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.36	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.37	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.38	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.39	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.40	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.41	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.42	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.43	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.44	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.45	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.46	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.47	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.48	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.49	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.50	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.51	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.52	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.53	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.54	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.55	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.56	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.57	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.58	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.59	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.60	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.61	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.62	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.63	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.64	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.65	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.66	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.67	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.68	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.69	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.70	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.71	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.72	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.73	50.4	502.2	502.4	502.4	502.4	502.3	502.3	502.5	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3	502.3																			
0.74	50.4	502.2	502.4	502.4	502																												

Liite 4. Kaksikäähimoottorin laskettu lämpenemä kytkennässä 2D-DOL.

Motor type code	M3BP 355SMB 4LL
Motor type	Squirrel cage Motor
Mounting designation	
Protected by enclosure	IP 55
Method of cooling	IC 411
Insulation	Class F
Standards	IEC
International efficiency classification (IEC 60034-30)	IE4
Ambient temperature, max.	40 °C
Altitude, max.	1000 m.a.s.l.
Converter supply	Direct Online
Duty type	S1
Temp. rise	Class B 71K
Connection of stator winding	2 Delta
Rated output	0 - 315 kW
Voltage	0 - 600 V
Frequency	0 - 50,0 Hz
Speed	0 - 1489,8 r/min
Current	0 - 365 A
Power Factor	0 - 0,86
Efficiency	0 - 95,8 %
Relat. maximum torque	0 - 0,0
Rated torque	0 - 2022 Nm
Direction of rotation	Uni-directional
Inertia rotor	Approx. 6 kgm ²
Bearings	Antifriction

Liite 5. Kaksikäänimoottorin laskettu lämpenemä kytkennässä YY30.

Motor type code	M3BP 355SMB 4LL
Motor type	Squirrel cage Motor
Mounting designation	
Protected by enclosure	IP 55
Method of cooling	IC 411
Insulation	Class F
Standards	IEC
Ambient temperature, max.	40 °C
Altitude, max.	1000 m.a.s.l.
Converter supply	Direct Online
Duty type	S1
Temp. rise	Class B 65,2 K
Connection of stator winding	YY30
Rated output	0 - 289 kW
Voltage	0 - 505 V
Frequency	0 - 50,2 Hz
Speed	0 - 1495,9 r/min
Current	0 - 197 A
Power Factor	0 - 0,91
Efficiency	0 - 95,7 %
Relat. maximum torque	0 - 0,0
Rated torque	0 - 1810 Nm
Direction of rotation	Uni-directional
Inertia rotor	Approx. 6 kgm ²
Bearings	Antifriction

Liite 6. Kaksikäähimoottorin laskettu lämpenemä kytkennässä 2D-DTC.

Motor type code	M3BP 355SMB 4LL
Motor type	Squirrel cage Motor
Mounting designation	
Protected by enclosure	IP 55
Method of cooling	IC 411
Insulation	Class F
Standards	IEC
Ambient temperature, max.	40 °C
Altitude, max.	1000 m.a.s.l.
Converter supply	Direct Online
Duty type	S1
Temp. rise	Class B 75,8 K
Connection of stator winding	Delta
Rated output	0 - 289 kW
Voltage	0 - 556 V
Frequency	0 - 50,4 Hz
Speed	0 - 1500,4 r/min
Current	0 - 361 A
Power Factor	0 - 0,90
Efficiency	0 - 95,3 %
Relat. maximum torque	0 - 0,0
Rated torque	0 - 1805 Nm
Direction of rotation	Uni-directional
Inertia rotor	Approx. 6 kgm ²
Bearings	Antifriction